



Universidad Autónoma  
de Madrid

**Doctorado en Estudios Artísticos, Literarios y de la Cultura**

**Facultad de Filosofía y Letras - Departamento de Música**

**Tesis doctoral:**

**La composición algorítmica y su aplicación en la generación de timbres,  
reverberación y espacialización.**

Doctorando: Luis Augusto da Fonseca

Directores / tutores:

José Luis Carles (UAM)

Sergio Luque Ancona (CSKG)

## **Abstract**

A lo largo de la historia, música y matemáticas siempre estuvieron unidas por las necesidades de las estructuras musicales: numeradores de compases, divisiones rítmicas etc. Con el paso del tiempo y los nuevos conocimientos musicales, muchos compositores han buscado relaciones entre esas dos «ciencias» aparentemente tan distantes, más allá de la pura necesidad de existencia y funcionamiento de la música, relacionando ritmos, alturas, armonías, estructuras e incluso métodos de composición musical que relacionan esas dimensiones de la música directamente con elementos matemáticos, como las secuencias numéricas, métodos de probabilidad y los propios algoritmos.

La complejidad que puede generar el trabajo de un compositor con ese tipo de operaciones matemáticas, la evolución de las nuevas tecnologías y en especial el uso del ordenador personal, dio paso a la posibilidad de elaborar cálculos matemáticos de manera más rápida y precisa. Además, las nuevas tecnologías abrieron las puertas a la síntesis electrónica del sonido, así como a la manipulación y elaboración del mismo utilizando principios no tradicionales.

*La elaboración racional de un sonido a través de una idea concreta se denomina “Síntesis no-estándar”.*

El objetivo principal de esta investigación es *la fusión de los algoritmos con la “Síntesis no-estándar”*. El proceso de investigación incluye una fase experimental basada en los antecedentes de la composición algorítmica y asistida por ordenador así como en la Síntesis no-estándar. Se parte del registro de los aspectos más relevantes de otros compositores, aplicándolo estos conocimientos a una experimentación sonora a través de la electrónica dirigida a generar timbres y otros elementos musicales como la reverberación, panoramización y las dinámicas.

Esa experimentación original pasaría por la creación de ondas sonoras a través de conectar linealmente los resultados surgidos de los algoritmos observando el timbre generado. Otros objetivos son:

- manipular los armónicos de una frecuencia concreta de un sonido complejo a través de proporciones algorítmicas,
- modificar su timbre en el proceso;
- localizar y movilizar un sonido en tres dimensiones con la utilización de algoritmos tridimensionales
- crear un espacio acústico completamente inaudito utilizando la respuesta de un algoritmo como base para la duración de sus reflexiones sonoras.



## ***Índice de contenidos***

<b>1. Composición algorítmica .....</b>	<b>19</b>
1.1. Definición y métodos utilizados por diversos compositores cronológicamente .....	19
1.2. Otros métodos frecuentes .....	31
1.2.1. Cadenas de Markov .....	31
1.2.2. Sistema de Lindenmayer .....	33
1.3. El tratado de Schillinger como método de composición algorítmica .....	36
1.3.1. Libro I: Teoría del ritmo .....	37
1.3.1.1. Interferencias entre periodicidades .....	38
1.3.2. Libro III: Variación de la música a través de proyecciones geométricas .....	40
1.3.2.1. Inversiones geométricas .....	40
1.3.2.2. Expansiones geométricas .....	42
1.3.3. Libro IV: Teoría de la melodía .....	44
1.3.3.1. Utilización de formas orgánicas en melodías .....	44
1.3.3.2. Conclusión .....	46
1.4. Iannis Xenakis y la composición estocástica .....	46
1.5. Composición algorítmica asistida por ordenador .....	55
1.6. Teoría del caos y fractales .....	61
1.6.1. Algoritmos más relevantes en esta investigación y ejemplos personales de su utilización .....	61
1.6.1.1. Conjunto de Mandelbrot .....	62
1.6.1.2. Mapa gaussiano .....	64
1.6.2. Atractores y atractores extraños .....	67
1.6.2.1. Atractor de Lorenz .....	68
1.6.2.2. Atractor de Henon .....	70
1.7. Métodos desarrollados individualmente: ejemplos en obras .....	72

1.8. Conclusiones del apartado .....	84
<b>2. Definición de «síntesis no-estándar» .....</b>	<b>84</b>
2.1. Teoría y metodología desarrollada cronológicamente para la síntesis del sonido .....	85
2.1.1. El <i>SSP</i> de Gottfried Michael Koenig .....	85
2.1.2. El <i>Sawdust</i> de Herbert Brün .....	86
2.1.3. La síntesis estocástica dinámica de Iannis Xenakis: los programas <i>Gendy</i> y <i>PARAG</i> .....	87
2.1.4. Softwares actuales y utilizados en esta investigación .....	89
2.2. Teorizando el sonido: metodología para construir timbre a través del uso de algoritmos .....	91
2.2.1. Teoría I .....	92
2.2.1.1. Realización de las ondas de la teoría I paso a paso.....	104
2.2.2. Teoría II .....	127
2.2.2.1. Patrones.....	133
2.2.2.2. Rutinas.....	134
2.3. Elementos musicales generados o controlados por algoritmos .....	145
2.3.1. Teoría III: La reverberación .....	145
2.3.2. Teoría IV: Panoramización tridimensional .....	155
2.4. Conclusiones del apartado .....	160
2.5. Bibliografía .....	167
<b>3. Encuesta y resultados .....</b>	<b>172</b>
3.1. Conclusiones de la encuesta .....	182
3.2. Conclusiones generales.....	187
<b>4. Composición de Atmospheres en 2 canales: conceptos y estrategias .....</b>	<b>192</b>
<b>5. Apéndices .....</b>	<b>195</b>
5.1. Apéndice I (digital - CD) con el material desarrollado en esta investigación .....	195
5.2. Apéndice II - Encuestas .....	198

5.3. Apéndice III - Obras.....	211
--------------------------------	-----

## ***Índice de figuras***

<b>Figura 1.</b> Relación entre notas y vocales en el sistema de D'Arezzo.....	19
<b>Figura 2.</b> Ejemplo musical utilizando el sistema mencionado en la Fig. 1.....	20
<b>Figura 3.</b> Cuatro de las tablillas descritas por Kircher - Arca Musarithmica.....	20
<b>Figura 4.</b> Tabla de números de compases de W.A. Mozart.....	21
<b>Figura 5.</b> Tercer compás de Klavierstück IX de Karlheinz Stockhausen.....	23
<b>Figura 6.</b> Compases 4 al 20 de Klavierstück IX de Karlheinz Stockhausen.....	23
<b>Figura 7.</b> Esquema de la estructura de la obra "...heute frueh, kurz vor dem Aufwachen..." de Sofia Gubaidulina.....	24
<b>Figura 8.</b> Primeros compases de "Étude 1 : Désordre" de György Ligeti.....	25
<b>Figura 9.</b> Primeros tres compases del cuarto movimiento de la obra "Movements" para quinteto de vientos de Tom Johnson.....	28
<b>Figura 10.</b> Esquema de interacción con probabilidades en una cadena de Markov.....	31
<b>Figura 11.</b> Cadena de Markov relacionada con compases musicales.....	32
<b>Figura 12.</b> Resultado de la iteración de la cadena de Markov arriba dibujada y su debida relación con los compases expuestos.....	33
<b>Figuras 13 a 16.</b> Iteraciones 1 a 4 del sistema arriba descrito para la percepción paso a paso de su construcción gráfica.....	35
<b>Figura 17.</b> Esquema musical utilizando la curva de Hilbert.....	36
<b>Figura 18.</b> Resultado musical de la utilización del sistema de Lindenmayer.....	36
<b>Figura 19.</b> Gráfico de representación de periodos musicales.....	37
<b>Figura 20.</b> Representación gráfica de diferentes pulsaciones según Schillinger.....	38
<b>Figura 21.</b> Gráfico de generadores rítmicos sincronizados verticalmente.....	39
<b>Figura 22.</b> Gráfico de generadores rítmicos sincronizados verticalmente.....	39
<b>Figura 23.</b> Gráfico de generadores rítmicos sincronizados verticalmente.....	39
<b>Figura 24.</b> Gráfico de inversiones geométricas para generar material melódico según el método descrito por Schillinger.....	41

<b>Figura 25.</b> La evolución de las cuatro inversiones geométricas sobre una melodía establecida.....	41
<b>Figura 26.</b> Gráfico ejemplificando una melodía original (pt) y sus expansiones geométricas.....	42
<b>Figura 27.</b> Gráfico ejemplificando una melodía original (pt) y sus expansiones geométricas.....	43
<b>Figura 28.</b> Gráfico ejemplificando una melodía original (p) y sus expansiones geométricas, entre dos y cuatro veces los intervalos originales.....	44
<b>Figura 29.</b> Gráfico desarrollado a partir de las proporciones de la secuencia de Fibonacci.....	44
<b>Figura 30.</b> Forma orgánica construida a través de la secuencia de Fibonacci.....	45
<b>Figura 31.</b> Notación musical del gráfico de la figura 31.....	45
<b>Figura 32.</b> Transposición musical de algunas octavas de la melodía expuesta en la figura 32 generando tres diferentes y posibles melodías.....	46
<b>Figura 33.</b> Dibujo original de la estructura formal de Achorripsis para orquesta de cámara.....	51
<b>Figura 34.</b> Compases 104 - 111 de Achorripsis de Iannis Xenakis.....	54
<b>Figura 35.</b> Foto de Lejaren Hiller con el ordenador laica en la University of Illinois, 1956.....	55
<b>Figura 36.</b> Carta de Iannis Xenakis a Lejaren Hiller en 1962.....	57
<b>Figura 37.</b> Foto del PDP-15, ordenador que utilizaba Koenig para ejecutar el Project II.....	60
<b>Figura 38.</b> Gráfico generado por la ecuación de Mandelbrot.....	64
<b>Figura 39.</b> Gráfico generado por la ecuación del mapa logístico.....	65
<b>Figura 40.</b> Mapa generado por la ecuación del Mapa Gaussiano.....	66
<b>Figura 41.</b> Particella del piano de la Gauss Sonata de Luis Fonseca: compás 1 al 3.....	67
<b>Figura 42.</b> Gráfico tradicional resultante de las iteraciones del sistema de Lorenz.....	69
<b>Figuras 43 y 44.</b> Gráficos resultantes de diferentes iteraciones del sistema de Lorenz.....	69
<b>Figura 45.</b> Gráfico tradicional generado por el atractor de Henon.....	70
<b>Figura 46.</b> Acentos generados por la ecuación de Henon.....	71

<b>Figura 47.</b> Ritmo generado por la sustitución por pausas de las notas no acentuadas en la cadena de 12 semicorcheas presentada en la figura 47.....	71
<b>Figura 48.</b> Ritmo generado por la sustitución por pausas de las notas acentuadas en la cadena de 12 semicorcheas presentada en la figura 47.....	71
<b>Figura 49.</b> Compás uno del segundo movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.....	73
<b>Figura 50.</b> Compases 13 a 15 del primer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.....	73
<b>Figura 51.</b> Compases 25 y 26 del primer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.....	74
<b>Figura 52.</b> Compases 1 al 13 del tercer movimiento de la Sonata Mandelbrot.....	74
<b>Figura 53.</b> Compases 9 al 13 del primer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.....	75
<b>Figura 54.</b> Compás 15 del tercer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca (micro-melodía).....	76
<b>Figura 55.</b> Compases 17 y 33 del primer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.....	76
<b>Figura 56.</b> Compás 85 del tercer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.....	77
<b>Figura 57.</b> El software SuperCollider.....	78
<b>Figura 58.</b> Tabla cromática de colores según sus frecuencias.....	79
<b>Figuras 59.</b> Cuadros de Rothko utilizados en la obra Hommage a Rothko de Luis Fonseca.....	80 - 81
<b>Figura 60.</b> Estructura de interconexión de la cadena de Markov creada para generar ritmos en la obra.....	81
<b>Figura 61.</b> Hommage a Rothko for choir a capella de Luis Fonseca compases 1 - 11....	83
<b>Figura 62.</b> Ejemplo de lista de programación con sus debidos comandos en el Sawdust de Herbert Brün.....	87
<b>Figura 63.</b> Dibujos de ondas de sonido ejemplificados por Iannis Xenakis.....	88
<b>Figura 64.</b> El software Max/MSP. ....	90
<b>Figura 65.</b> Onda sonora cuadrada.....	93
<b>Figura 66.</b> Espectro de una onda sonora cuadrada.....	93

<b>Figura 67.</b> Onda sonora de un ruido blanco abierta en el programa Audition.....	94
<b>Figura 68.</b> Análisis espectral de un ruido blanco.....	94
<b>Figura 69.</b> Distribución bidimensional de los resultados de una cadena de respuestas del algoritmo de Mandelbrot.....	95
<b>Figura 70.</b> Interpolación de los puntos de la distribución dimensional de la fig. 65.....	96
<b>Figura 71.</b> Onda generada por los puntos distribuidos bidimensionalmente en la fig. 65 y sin interpolación.....	96
<b>Figura 72.</b> Foto de la forma de onda MandelBrotL 100 Hz y $c = -1,65$ abierta en el programa Audition.....	98
<b>Figura 73.</b> Foto de la forma de onda MandelBrot 100 Hz y $c = -1,65$ abierta en el programa Audition.....	99
<b>Figura 74.</b> Foto de la forma de onda MandelBrot a 1000 Hz y $c = -1,5$ abierta en el programa Audition.....	100
<b>Figura 75.</b> Análisis espectral de la onda MandelBrot a 1000 Hz y $c = -1,3$ .....	100
<b>Figura 76.</b> Foto de la forma de onda MandelBrotL a 1000 Hz y $c = -1,5$ abierta en el programa Audition.....	100
<b>Figura 77.</b> Análisis espectral de la onda MandelBrotL a 1000 Hz y $c = -1,3$ .....	101
<b>Figura 78.</b> Foto de la forma de onda MandelBrotL a 1000 Hz y $c = -1,95$ abierta en el programa Audition.....	101
<b>Figura 79.</b> Análisis espectral de la onda MandelBrotL a 1000 Hz y $c = -1,95$ .....	101
<b>Figura 80.</b> Foto de la forma de onda Gauss a 1000 Hz, $a = -8,7$ y $b = -0,4$ abierta en el programa Audition.....	102
<b>Figura 81.</b> Análisis espectral de la onda Gauss a 1000 Hz, $a = -8,7$ y $b = -0,4$ .....	103
<b>Figura 82.</b> Foto de la forma de onda GaussL a 1000 Hz, $a = -8,7$ y $b = -0,4$ abierta en el programa Audition.....	103
<b>Figura 83.</b> Análisis espectral de la onda Gauss a 1000 Hz, $a = -8,7$ y $b = -0,4$ .....	104
<b>Figura 84.</b> Página tutorial de SuperCollider.....	106
<b>Figura 85.</b> Página web de GitHub con los plugins de ejemplo para construir UGens....	106
<b>Figura 86.</b> Página de GitHub que contiene los archivos descargables del plugin de ejemplo Boring mixer.....	107
<b>Figura 87.</b> Página web de descarga gratuita del software CMake.....	112

<b>Figura 88.</b> Pantalla inicial del programa CMake.....	113
<b>Figura 89.</b> Pantalla de definición del programa de destino en CMake.....	114
<b>Figura 90.</b> Pantalla del programa Cmake indicando errores a corregir para compilar el archivo inicial.....	115
<b>Figura 91.</b> Pantalla del programa CMake, sin errores en el texto y listo para compilación de los archivos del proyecto de Xcode.....	115
<b>Figura 92.</b> Carpeta que contiene los dos archivos modificados y ubicados conjuntamente.....	116
<b>Figura 93.</b> Carpeta con todos los archivos generados por CMake.....	116
<b>Figura 94.</b> Página de descarga del programa SuperCollider en código abierto.....	118
<b>Figura 95.</b> La App Store de usuarios de Mac con el icono para descarga de Xcode.....	119
<b>Figura 96.</b> El programa Xcode con el código C++ del ejemplo BoringMixer.....	120
<b>Figura 97.</b> El software SuperCollider con el código Gauss.sc.....	124
<b>Figura 98.</b> Pantalla de SuperCollider con el archivo Gauss.schelp y la ventana de ayuda lateral.....	126
<b>Figura 99.</b> Secuencia natural de armónicos.....	127
<b>Figura 100.</b> Forma de onda del ruido gris.....	131
<b>Figura 101.</b> Análisis espectral del ruido gris.....	131
<b>Figura 102.</b> Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II.....	137
<b>Figura 103.</b> Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos.....	137
<b>Figura 104.</b> Forma de onda y análisis espectral de un sonido teñido generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos.....	139
<b>Figura 105.</b> Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos y de sus dinámicas, con valores absolutos.....	143
<b>Figura 106.</b> Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos y de sus dinámicas, sin valores absolutos.....	144
<b>Figura 107.</b> Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos y con reverberación algorítmica.....	153

**Figura 108.** Forma de onda y análisis espectral de varios sonidos pulsados generado por la teoría II sin manipulación de sus armónicos y con cambio de tiempos de reverberación en cada pulsación.....155

**Figura 109.** Croquis de una panoramización Azimuth a cuatro canales y sus valores de panoramización.....157

**Figura 110.** Patch realizado en Max/MSP para la panoramización en tres dimensiones utilizando el atractor de Lorenz.....159

## ***Índice de tablas***

**Tabla 1.** Probabilidades correspondientes a la cadena de Markov arriba descrita.....32

**Tabla 2.** Esquema de organización de los dos volúmenes del método de Schillinger..... 37

**Tabla 3.** Resultados de la fórmula de Poisson con la media definida anteriormente..... 48

**Tabla 4.** Resultados de la multiplicación de la tabla 3 por 196..... 49

**Tabla 5.** División esquemática de la obra en células de unidad de tiempo distribuida entre los instrumentos..... 50

**Tabla 6.** Distribución de número de eventos por columna..... 50 - 51

**Tabla 7.** Esquema de la densidad sonora de la obra por compás, segundo y célula.....52

**Tabla 8.** Probabilidades de la primera estancia de la cadena de Markov creada para generar ritmos..... 82

**Tabla 9.** Probabilidades de la segunda estancia de la cadena de Markov creada para generar ritmos..... 82

**Tabla 10.** Tabla que relaciona el resultado final de la cadena de Markov anteriormente descrita con la subdivision de la célula rítmica deseada..... 82



## Agradecimientos

*A todos aquellos que de alguna manera, directa o indirectamente, me ayudaron en el largo y complejo camino que fue la investigación y redacción de esta tesis.*

*A mis tutores José Luis Carles y Sergio Luque Ancona, por su paciencia y asistencia en todos los momentos que hicieron parte de este largo camino.*

*A mi esposa Jing Shao, por su apoyo constante e incondicional.*

*A mi madre Valentina, que siempre estuvo a mi lado.*

## Introducción

Desde el primer momento en el que entré en contacto con técnicas composicionales que utilizaban composición algorítmica, en mis estudios de Máster en Composición Electroacústica, quedé maravillado con la idea central de esta práctica de generar música a través de reglas que actúan indirectamente en ese proceso y terminan por generar algo completamente sorprendente y, muchas veces, lejos de lo que podíamos haber imaginado antes de empezar el proceso. A medida que más me adentraba en su conocimiento, más me motivaba seguir conociendo lo que los compositores habían creado a lo largo de la historia, por un lado y, por el otro, más aplicaba los conocimientos que iba adquiriendo y podía desarrollar por mí mismo en mis composiciones, de tal manera que puedo afirmar que esa práctica composicional no solamente influyó, sino que cambió por completo mi técnica actual de composición. La utilización de algoritmos, probabilidades y otros métodos relacionados para componer elementos musicales, me motivó a seguir indagando y profundizando, hasta dedicarme a la investigación y redacción de esta tesis enfocada en la composición algorítmica. Mi intención al principio fue únicamente investigar el pasado en búsqueda de diferentes métodos desarrollados por compositores a lo largo del tiempo, que ya es ardua tarea, visto que una gran parte de esos compositores no dejó una referencia precisa de cómo han llevado a cabo esa práctica composicional y, por lo tanto, se torna de difícil acceso y comprensión sin algún análisis más profundo que pueda recoger algún libro que trate el tema; sin embargo, y al discutir el argumento con diversas personas, mis tutores incluidos, se me ha abierto la visión hacia una investigación y experimentación diferentes, visto que la composición algorítmica también puede ser utilizada en otras dimensiones de la música, como en la generación de timbres, reverberación y panoramización, entre otras, utilizando la electrónica como herramienta y la síntesis no-estándar como marco teórico que se aplica y mezcla a la composición algorítmica.

El enfoque más general de esta tesis, sin descartar el estudio detallado de lo que se produjo con métodos algorítmicos composicionalmente hasta el día de hoy, estaría basado en los procesos generativos con ideas concretas relacionadas con diversos algoritmos y sus posibles resultados tímbricos como producto de esa idea inicial, buscando apoyar esos procesos en campos de la composición no muy investigados como la «síntesis no-estándar», y buscando generar de ese modo, timbres y otros elementos de la composición musical electroacústica, como la reverberación y la espacialización.

Esos algoritmos, de los cuales se hará un estudio exhaustivo de su origen y comportamiento a lo largo de estas páginas, proceden de una serie de utilidades diferentes, conectando así la música con otras disciplinas, como pueden ser, la biología, la astronomía o la arquitectura y son conocidos como: conjunto de Mandelbrot, sistemas de Lindenmayer, mapa de Henon, mapa de Gauss y atractor de Lorenz, todos ellos relacionados con los fractales y la autosimilitud.

Estos algoritmos, actualmente, son utilizados para generar elementos musicales en diferentes composiciones, como ritmos, melodías, armonías, etc. En el área del arte gráfico, generado por ordenador igualmente, las imágenes creadas por esos algoritmos son de gran calidad e interés artístico. Su aplicación es infinita, también en la composición algorítmica asistida por ordenador, donde pueden ser utilizados no solo para generar sonidos, aspecto que enfocará la experimentación en esta tesis, sino también para modular o componer elementos dentro de una estructura composicional electroacústica.

Si entendemos la síntesis no-estándar como la síntesis de microsonidos a través de ideas composicionales y estructurales de los mismos, este sería, utilizando los algoritmos citados anteriormente, el objetivo central de la experimentación generativa de elementos musicales de esta investigación. El origen de esta técnica poco usual viene de compositores del siglo XX como König, Brün y Xenakis que empezaron a utilizar el ordenador como fuente de síntesis de sonido a través de ideas composicionales y organización musical del mismo, al contrario de los medios estándar hasta entonces utilizados basados en métodos físicos, acústicos o psicoacústicos.

El desarrollo de la música electroacústica hasta la actualidad ha necesitado para su elaboración programas para ordenadores como el SuperCollider y el Max/MSP, de diferentes estructuras entre sí pero con la misma finalidad: generar, manipular y controlar sonidos electrónicos. Estos dos programas son estándar en la producción musical electrónica y las principales herramientas para generar timbres, reverberación y espacialización, que son nuestros objetivos.

En consecuencia, se han desarrollado en SuperCollider generadores de señales de audio y patrones basados en los algoritmos de mayor interés en esta investigación, utilizando técnicas diferentes para ello, que puedan generar timbres, manipulados desde procesos caóticos o de autosimilitud fractal antes establecidos (Mandelbrot, Henon, Gauss), y poder desde la síntesis no-estándar crear formas de ondas desde su manipulación o utilizarlos para generar texturas sonoras a través de la manipulación de los armónicos de un sonido que puedan desempeñar alteraciones de aspectos tímbricos.

En el ámbito de la reverberación, las ideas para encontrar ambientes acústicos basados en los algoritmos parten de utilizar las cadenas de respuesta de dichos algoritmos con los tiempos de reflexión (cortos, medios y largos) que comprenden la idea y composición virtual de una reverberación, conectando ese espacio psicoacústico con sus proporciones matemáticas caóticas o periódicas.

La experimentación con la espacialización se basa en utilizar algoritmos con respuestas tridimensionales como el atractor de Lorenz para localizar una fuente sonora en un espacio demarcado por altavoces en tres dimensiones, con la utilización del *software* Max/MSP y con objetos desarrollados por el ICST (Institut for Computer Music and Sound Technology) de Zúrich, que hacen una distribución del sonido utilizando la técnica *Ambisonics* para ello, que ayuda a la transición y distribución del sonido entre los canales parecer más real o natural. La espacialización, sin embargo, es un tema complejo y profundo, así que será tratado como técnica composicional a través de la composición algorítmica.

Se intentará de esa forma, hacer un trazado nítido, desde el principio de la tesis hasta su final, entre la historia de la composición algorítmica, la síntesis no-estándar y la experimentación que pretendemos llevar a cabo como resultado final entre esas dos técnicas composicionales, que derive en un múltiple resultado de sonidos y aplicarlos posteriormente a una composición musical como elemento final de esta investigación.

## Objetivos generales

Esta tesis está dividida en tres apartados principales que forman el cuerpo de la tesis y que coinciden y desarrollan los tres objetivos generales de esta investigación:

– Definir conceptualmente la composición algorítmica y profundizar en la investigación y estudio de las diferentes técnicas composicionales desarrolladas a través de la composición algorítmica a lo largo de la historia y en diferentes épocas, haciendo un recorrido en el tiempo desde el primer caso que se conoce en la historia de la música que se pueda relacionar con un proceso generativo que se corresponda con la composición algorítmica hasta casos más actuales de compositores contemporáneos, profundizando en ejemplos y reglas que puedan haber sido desarrolladas por los mismos compositores, creando así precedentes de utilidad informativa necesaria para la experimentación y, por

lo tanto, la generación de material composicional. Toda esta información estará comprendida en el apartado 1 de esta investigación.

- Definir conceptualmente la síntesis no-estándar, estableciendo precedentes desarrollados históricamente con la ayuda de ordenadores por compositores como Iannis Xenakis, Herbert Brün y Gottfried Michael König; nos adentraremos en los programas y conceptos estructurales de la generación de timbres electrónicos utilizados por esos compositores. Igualmente, y después de esas definiciones e investigación histórica, se establece como objetivo general desarrollar algunas teorías que puedan servir como base para la experimentación que une la composición algorítmica con la síntesis no-estándar e intentar obtener como resultado la generación de timbres electrónicos.

- Desarrollar una encuesta, después de sentar precedentes y prioridades en su estructura, que ayude a la consecución del siguiente objetivo general: contrastar los resultados de la experimentación descrita en el objetivo general anterior, a través de archivos sonoros que contengan material composicional diversificado y preestablecido, generado por las teorías de estructuración expuestas en el apartado 2, a través de la síntesis no-estándar unida a la composición algorítmica y que puedan ser analizadas desde el lado perceptivo por diferentes personas que tengan la experiencia y costumbre de trabajar o escuchar ese tipo de sonidos electrónicos. Las respuestas de esta encuesta aportarán datos muy valiosos para poder contrastar mi percepción personal de ese material composicional generado en la experimentación, visto que al trabajar y manipular los sonidos personalmente, mi percepción de los mismos puede quedar afectada por una imparcialidad. Utilizando el aporte de ese material generado por otras personas, se puede llegar a la conclusión de si la experimentación hecha en el apartado 2 fue satisfactoria y alcanzó nuestros aquí expuestos objetivos generales y terminó por demostrar nuestra hipótesis.

### **Objetivos específicos en el primer apartado:**

- Analizar, parcialmente, las obras generadas por técnicas de composición algorítmica, para identificar mejor el resultado musical de las mismas.

- Exponer métodos generativos por asociaciones matemáticas para la creación de material composicional o estructural, a través de la utilización de secuencias matemáticas u otros casos similares.
- Determinar los principales métodos, libros y compositores que puedan tener una relevancia mayor como ejemplo de composición algorítmica.
- Identificar e investigar históricamente la aparición de la composición algorítmica asistida por ordenador como precedente del trabajo que desarrollo como compositor y conectado a la experimentación que se realizará en el apartado 2.
- Definir conceptualmente la teoría del caos, los fractales y la autosimilitud que serán la base para nuestra experimentación y técnicas composicionales.
- Establecer los principales algoritmos, sus precedentes, historia de su desarrollo así como su principal desarrollador, la raíz de su nombre y su aplicación común fuera del ámbito musical. Exponemos así, y a la vez, los algoritmos que serán relevantes en la experimentación del apartado 2.
- Exponer un ejemplo con la ayuda de un pequeño análisis de una obra desarrollada con métodos personales involucrando composiciones con instrumentos acústicos que va conectado con el algoritmo en cuestión y su exacta utilización en ese proceso generativo.
- Analizar más detalladamente obras de mi autoría que abarcan los métodos creados individualmente que estén relacionados con los algoritmos descritos en este apartado, así como con los métodos comunes y más utilizados que fueron expuestos a lo largo del apartado.

### **Objetivos específicos en el segundo apartado:**

- Hacer un recorrido por los programas de síntesis de sonido estándar que se usan en la actualidad, y que serán claves en la investigación y experimentación desarrollada en el apartado.

- Definir brevemente conceptos que serán utilizados para crear material composicional, como el timbre, la reverberación y la panoramización, para la mejor comprensión de la manipulación de las estructuras que generan esos conceptos.
- Relacionar la composición algorítmica con esos conceptos y utilizar la síntesis no-estándar como idea central para su generación y manipulación.
- Crear UGens y patrones en SuperCollider como producto de nuestra experimentación, así como patchs en Max/MSP y que sean parte del apéndice digital de esta tesis para su futura consulta en relación a las teorías generadoras del apartado.
- Registrar varias muestras de sonidos electrónicos en el apéndice digital, para que sirvan como ejemplo de material composicional desarrollado en la experimentación de esta investigación.
- Componer una obra corta y puramente electrónica en dos canales, utilizando únicamente sonidos desarrollados en la experimentación de este apartado así como todas las otras dimensiones composicionales que puedan haber formado parte de ese proceso. Registrar esa obra en el apéndice digital de esta investigación para su escucha como ejemplo de sonidos que fueron desarrollados en esta investigación.

### **Objetivos específicos en el tercer apartado:**

- Detectar si la percepción de la manipulación de armónicos con proporción matemática resulta en un cambio claro de timbre o si se nota el origen de la manipulación.
- Detectar si el cambio de forma de onda a través de la modulación de los valores de inicio de la ecuación mientras suena esa onda es notable como cambio de timbre.
- Detectar si la reverberación con tiempo de reflexión adaptado a proporciones matemáticas puede ser percibido como una alteración tímbrica.
- Comparar dos sonidos creados con armónicos en los cuales su afinación sigue proporciones matemáticas, donde en uno de ellos se aplica una dinámica exponencial y el otro con dinámicas distribuidas en proporciones matemáticas.

- Comparar las ondas sonoras creadas en la experimentación del apartado 2 y si se detecta la diferencia de timbre entre ellas y ondas sonoras preexistentes como una onda sinusoidal.
- Demostrar la percepción de microsonidos generados a través de nuestra experimentación.

## Hipótesis

Visto el perfil de esta investigación, donde se priorizará la experimentación con sonidos electrónicos para la generación de timbres, reverberación, dinámicas y espacialización, su desarrollo nos indicará si se ha podido demostrar el planteamiento de la siguiente hipótesis:

*La composición algorítmica genera microsonidos.*

De acuerdo con lo que hemos planteado como objetivos generales y específicos, tenemos la intención de utilizar la síntesis no-estándar como marco teórico en el cual aplicaremos ideas generativas que provienen de la composición algorítmica. En este trazado, haremos una experimentación sonora utilizando la teoría que compondremos de acuerdo con esas ideas e intentaremos demostrar, según su logro, la creación de microsonidos.

Sin embargo, vale la pena definir brevemente el término *microsonidos*, para que esté más claro el fundamento de nuestra experimentación:

Con el advenimiento de la tecnología, los compositores pueden aplicar principios de diseño musical más allá del nivel de las representaciones de notas u objetos sonoros. La tecnología informática, junto con la representación digital del sonido, permitió el control preciso de la formación del sonido. Los conceptos y formalizaciones de la composición algorítmica asistida por computadora pueden aplicarse potencialmente desde la construcción de piezas enteras, secciones y frases hasta la estructuración de los propios objetos de sonido. A este respecto, la noción de microsonidos permite la integración de los diversos niveles de composición. (Valsamakis, 2013, p. 23)



Otro buen acercamiento a la definición de microsonidos es el que hace Phil Thomson:

Microsonido es un enfoque emergente para la composición y el análisis de la música que pone énfasis en escalas de tiempo extremadamente breves, generalmente una décima de segundo o menos, así como una integración de este nivel de microtiempo con los niveles de tiempo de los gestos de sonido, secciones, movimientos y piezas enteras. [...] Microsonido generalmente funciona con una integración de escalas de tiempo, relacionando el nivel de sub-nota con el nivel de gestos de sonido, secciones, movimientos y piezas enteras. Como tal, hasta ahora parece ser el enfoque de la música electroacústica y el diseño de sonido lo que más se acerca a la realización del sueño de larga data de la «composición total»: la composición de todo, desde la forma general hasta los sonidos individuales. (Thomson, 2004, p. 1)

## Capítulo 1 - Composición algorítmica

### 1.1. Definición y métodos utilizados por diversos compositores cronológicamente

La composición algorítmica ha sido utilizada como sistema composicional en distintas épocas de la historia de la música por su posible adaptación a la creación musical de los diferentes estilos. Su utilización es generalmente concebida dentro de un método formal en el que se incluyen reglas desarrolladas por el mismo compositor en el proceso creativo, las cuales generan alturas, ritmos, armonías, estructuras formales entre muchas otras posibilidades, incluyendo la composición de sonidos con la ayuda de la electrónica y música por ordenador.

Dentro de estas reglas y estructuras, se encuentran métodos como la utilización de proporciones, ecuaciones matemáticas, sustituciones y relaciones entre elementos, donde el compositor construye las reglas, pero no controla los resultados finales. Aunque muchos compositores no hicieran referencia a su uso, conllevando así la desinformación sobre sus métodos personales, muchos sí que dejaron referencias de sus sistemas y reglas para generar elementos musicales.

Nos remitimos al siglo XI para encontrar el primer caso de la utilización de un método de composición algorítmica del que tenemos referencia, estructurado por Guido D'Arezzo, una personalidad musical importante en el periodo medieval, y gran contribuidor en el desarrollo de la notación musical hoy en día utilizada. D'Arezzo desarrolló un método que generaba música de manera asociativa con un sistema de conversión automática de texto en frases musicales. En su tratado *Micrologus* para práctica vocal describe este sistema, que consistía en crear un mapa estructural relacionando las cinco vocales que contienen las sílabas de un texto con notas musicales, creando frases (*neumes*) que serían separadas por pequeñas pausas o respiraciones (*cesurae*), automatizando así la construcción de melodías (Nierhaus, 2009, pp. 21 - 23).

Ese mapa estructural asociativo sería como el indicado abajo:



**Fig. 1.** - Relación entre notas y vocales en el sistema de D'Arezzo.



Fig. 2. Ejemplo musical utilizando el sistema mencionado en la Fig. 1. <sup>1</sup>

Atanasius Kircher con su *Arca Musarithmica* descrita en su tratado *Musurgia Universalis* de 1650 es un ejemplo importante donde se puede asociar más claramente la presencia del azar en sus reglas. Se desarrolla a través de tres categorías de tablillas de madera (*syntagmas*), donde cada una contiene un conjunto de números y de patrones rítmicos. A través de la elección de una de esas tablillas, los patrones rítmicos a cuatro voces serán combinados con los números en los *syntagmas*, que representan los grados de los modos empleados. Las tablillas podían contener entre dos y doce unidades. Esas unidades sirven para la transferencia de texto y representan una sílaba cada una, con lo cual deben ser elegidas de acuerdo con el número de sílabas que contenga el texto elegido. De esa manera, cada altura asignada será combinada con su estructura rítmica correspondiente, generando así un movimiento a cuatro voces al estilo *contrapunctus simplex* (Nierhaus, 2009, pp. 25 - 26).

<p><i>Symphonica.</i> Strophæ. I.</p> <p>Toni. I. II. III. IV.</p> <p>73 28 76 88 87 8 88 76 5 4 5 6 4 5 5 5 5 5 3 3 8 3 4 8 2 3 88 5 6 3 4 8 4 6 5 1</p> <p>23 32 33 2 4 5 4 5 78 87 88 2 8 7 6 7 5 5 5 5 5 5 8 2 2 2 5 3 1 5 1 8 7 6 5 2 5</p> <p>78 87 88 2 3 6 5 5 5 5 5 5 5 5 8 8 7 8 2 2 2 3 3 2 1 4 2 3 5 3 1 5 1 8 7 6 4 5 1</p> <p>73 23 23 2 4 6 5 5 88 78 78 88 87 8 5 5 5 5 5 5 1 4 2 3 1 1 5 1 5 8 7 6 3 5 1</p> <p>87 8 2 3 7 7 2 8 7 5 5 6 7 7 6 5 5 7 5 5 3 2 3 4 5 4 2 3 4 3 2 1 5 8 7 3 4 5 3 7 1 5</p> <p>87 8 6 8 7 3 8 3 2 3 5 5 5 4 5 5 5 6 5 5 5 3 2 3 1 3 2 8 8 7 8 1 5 3 4 1 5 3 4 1 5 1</p> <p>Notæ temporis.</p> <p>Tripla</p>	<p><i>Symphonica.</i> Strophæ. II.</p> <p>Toni. I. II. III. IV.</p> <p>88 78 88 2 2 8 8 6 7 5 5 5 5 6 7 7 5 5 4 5 3 3 2 3 3 4 4 3 3 2 2 1 1 5 1 1 7 7 1 1 2 5</p> <p>5 5 5 3 5 4 3 3 5 4 5 7 7 7 8 7 7 7 8 7 7 7 5 5 5 1 2 4 4 3 3 2 3 3 3 3 6 3 7 5 6 3 7 3</p> <p>3 3 2 4 3 4 4 3 3 2 2 8 8 7 8 8 2 2 8 8 6 7 5 5 6 5 2 2 5 5 4 5 8 8 5 4 8 7 7 8 8 2 5</p> <p>7 7 7 8 2 8 7 6 8 6 7 5 5 4 5 7 5 5 4 5 4 5 3 3 4 3 4 3 2 3 2 2 3 3 2 1 7 2 5 2 1 2 5</p> <p>5 5 5 4 3 2 3 8 3 2 3 7 7 7 5 1 7 6 7 6 7 3 3 3 2 3 4 5 3 7 4 5 3 3 3 7 8 7 6 5 4 3</p> <p>3 4 5 4 2 3 4 5 4 5 8 8 7 8 7 8 2 7 8 7 7 5 1 3 6 5 5 2 3 3 2 3 8 6 3 4 5 8 7 5 6 7 3</p> <p>Notæ temporis.</p> <p>Tripla</p>	<p><i>Symphonica.</i> Strophæ. III.</p> <p>Toni. I. II. III. IV.</p> <p>2 3 2 3 2 4 2 6 5 5 78 87 88 2 8 8 7 8 5 5 5 5 5 5 1 4 2 3 5 3 1 5 1 8 7 6 4 5 1</p> <p>3 3 3 4 5 1 2 8 8 7 8 8 8 8 8 7 6 7 5 5 5 5 5 5 1 2 4 4 3 3 2 3 1 1 1 6 5 4 2 3 1 5 1</p> <p>3 3 3 8 7 6 8 7 8 7 8 7 7 7 6 5 4 5 5 4 5 5 5 5 5 3 3 1 3 2 1 2 3 3 3 3 6 3 4 1 5 6 5 1</p> <p>3 2 8 7 3 2 8 7 8 7 8 7 7 5 5 7 6 6 5 4 5 5 5 4 3 2 5 4 4 2 1 2 3 8 7 8 5 3 4 4 5 6 4 1</p> <p>2 4 3 4 5 3 2 8 8 7 8 7 8 7 8 8 7 5 6 5 5 4 4 5 6 5 5 4 3 2 2 3 7 6 5 4 3 1 2 3 4 5 1</p> <p>2 3 2 3 2 5 4 3 2 3 7 7 7 7 7 7 6 5 5 5 5 5 4 5 5 4 3 8 8 7 8 3 3 7 3 3 7 3 4 1 5 1</p> <p>Notæ temporis.</p> <p>Tripla</p>	<p><i>Adoniatro.</i> Strophæ. IV.</p> <p>Toni. I. II. III. IV.</p> <p>3 2 4 5 5 8 2 8 7 8 5 5 1 2 3 8 7 6 5 1</p> <p>8 8 8 7 8 5 5 6 5 5 3 3 4 2 3 8 8 4 8 1</p> <p>8 8 3 2 3 6 6 8 7 8 4 4 5 5 5 4 4 1 5 1</p> <p>7 8 8 7 8 5 5 5 5 5 2 3 3 2 3 5 3 1 5 1</p> <p>5 3 6 5 5 7 8 8 7 8 5 1 2 3 3 6 4 5 1</p> <p>6 8 8 7 8 4 5 5 5 5 8 2 2 3 2 4 3 3 5 1</p> <p>Notæ temporis.</p> <p>Tripla</p>
---	--	---	--

Fig. 3. Cuatro de las tablillas descritas por Kircher - *Arca Musarithmica* (Legard, 2014).

<sup>1</sup> El texto utilizado para componer esa pequeña frase musical es el del Salmo 23 traducido al latín. Compuesto por Luis Fonseca para ejemplificar el sistema de D'Arezzo.

Otro ejemplo a considerar sobre la utilización clara del azar es el *Musikalisches Würfelspiel* (juego musical de dados), usualmente adjudicado a W. A. Mozart, aunque en la época era una práctica frecuente entre muchos otros compositores. Este es un sistema donde los dados eran utilizados para generar música de manera aleatoria a través de un mapa preconcebido. El sistema es simple pero efectivo: a cada compás de referencia (del 1 a 8 en el ejemplo abajo), se le asigna 22 frases de ocho compases de variaciones musicales de esta frase inicial, o sea, 176 compases en total. Para dos dados hay hasta 11 variaciones disponibles (como indica las líneas de la tabla de la figura 4). Para completar la tabla (y la obra a su vez), se empieza con el primer cuadro arriba a la izquierda, adjudicado al primer compás de cada frase (como indica las columnas de la figura 4). Si la suma de los dados fuere un tres por ejemplo, el compositor puede elegir entre el primer compás de la segunda frase o el primer compás de la frase 13, visto el material doblado (22 frases) previamente escritas. Con esa misma regla, rellena todos los cuadros de la tabla. El juego parece ser sencillo, pero realmente es necesario un talento compositacional enorme, vistas las posibilidades armónicas, así como las técnicas para la futura posible ejecución de la obra.

WOLFGANG AMADEUS MOZART

### Musikalisches Würfelspiel

Table of Measure Numbers

Part One

Part Two

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
2	96	22	141	41	105	122	11	30	2	70	121	26	9	112	49	109	14
3	32	6	128	63	146	46	134	81	3	117	39	126	56	174	18	116	83
4	69	95	158	13	153	55	110	24	4	66	139	15	132	73	58	145	79
5	40	17	113	85	161	2	159	100	5	90	176	7	34	67	160	52	170
6	148	74	163	45	80	97	36	107	6	25	143	64	125	76	136	1	93
7	104	157	27	167	154	68	118	91	7	138	71	150	29	101	162	23	151
8	152	60	171	53	99	133	21	127	8	16	155	57	175	43	168	89	172
9	119	84	114	50	140	86	169	94	9	120	88	48	166	51	115	72	111
10	98	142	42	156	75	129	62	123	10	65	77	19	82	137	38	149	8
11	3	87	165	61	135	47	147	33	11	102	4	31	164	144	59	173	78
12	54	130	10	103	28	37	106	5	12	35	20	108	92	12	124	44	131

Table of Measures

**Fig. 4.** Tabla de números de compases de W.A. Mozart (Edwards, 2011, p. 58). <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Esquema del *Juego de dados musical* de W.A. Mozart, con su tabla de números referentes a los compases y la tabla de compases a relacionar.

John Cage hizo algo similar en su *Music of Changes* compuesta de cuatro libros de obras para piano solo generadas con la utilización del método *I Ching*, en su origen un manual de adivinación de procedencia china. Lo que nos ofrece principalmente el *I Ching* es una estructura de ideas representadas en los diferentes hexagramas (64) y de las relaciones que se establecen entre las mismas. La traducción literal de *I Ching* es *El Libro de los cambios*, nombre al que hace referencia el título de la obra de Cage.

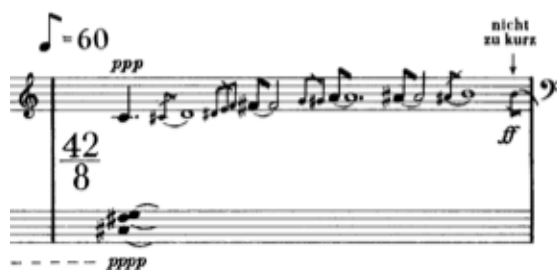
El compositor utiliza tablas de 8 x 8 para facilitar el trabajo con el *I Ching*, compuesto por 64 hexagramas. Cada tabla contiene un evento sonoro. Cage consulta el *I Ching* para elegir cual evento sonoro utiliza y posteriormente hace lo mismo para asignarle duraciones y dinámicas que están plasmados en otras dos tablas. De esa manera Cage va escribiendo pequeños segmentos musicales. Los silencios son generados también a través de la tabla de eventos, la cual solamente contiene elementos musicales en los hexagramas impares del *I Ching*.

La polifonía musical se crea a través de unas franjas determinadas en cantidad por el *I Ching*, uniendo así un grupo de eventos sonoros a otros. El tiempo también se modifica a lo largo de la obra, utilizando el *I Ching* y una tabla para ello.

Con el paso de los años, la aproximación de las matemáticas a los procesos creativos en la música se hizo cada vez más notable. El uso, por ejemplo, de series matemáticas como la de Fibonacci fue frecuente en muchos compositores. La serie de Fibonacci es una sucesión de números formada por la suma de los dos números anteriores y también está conectada con la sección áurea:

[1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597...]

Esa sucesión fue utilizada por varios compositores y de muchas maneras diferentes para generar material musical. Karlheinz Stockhausen hace uso de ella, por ejemplo, en su *Klavierstück IX* (1955-1961), donde la aplica por ejemplo en el compás tres, considerado como «segundo tema» de la obra, donde relaciona el valor 1 a una corchea y utiliza los valores de Fibonacci, aunque no en su orden natural, para dar valor rítmico al resto de las notas del mismo compás. La corchea tiene valor 1, con lo cual, la primera negra puntuada, que contiene tres corcheas, tendría en consecuencia un valor 3. Si lo observamos en ese mismo compás (abajo ilustrado), tendríamos: [3, 8, 5, 13, 5, 8], todos números de Fibonacci, aplicados en una serie cromática de 12 notas:



**Fig. 5.** Tercer compás de Klavierstück IX de Karlheinz Stockhausen (Stockhausen, Karlheinz. Klavierstück IX. 1954/1961. Viena: Universal Edition - UE 13675 e. Edición).

También aplica números pertenecientes a la secuencia de Fibonacci en los numeradores de los compases 4 al 20 en la siguiente orden:

[13, 2, 21, 8, 1, 3, 8, 1, 5, 13, 2, 5, 3, 21, 3, 1, 13]

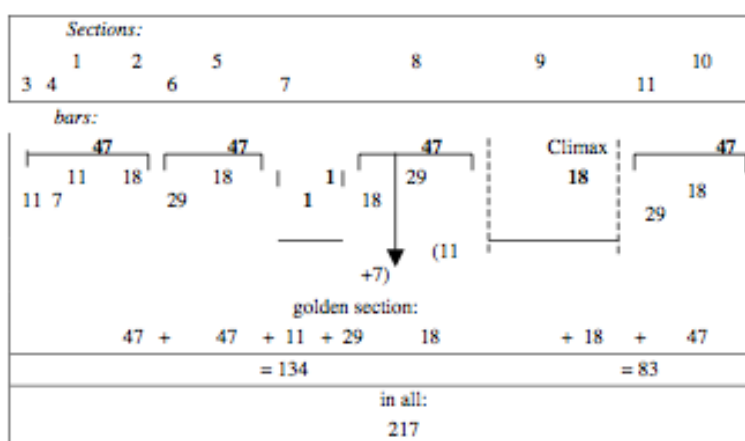
**Fig. 6.** Compases 4 al 20 de Klavierstück IX de Karlheinz Stockhausen (Stockhausen, Karlheinz. Klavierstück IX. 1954/1961. Viena: Universal Edition - UE 13675 e. Edición).

Sofia Gubaidulina es otra compositora que ha utilizado números y proporciones matemáticas en la construcción de sus obras realizadas después de los años 80. Son constantes y muy influyentes en su obra tanto la secuencia de Fibonacci como la de Lucas, construida como la de Fibonacci, con la suma de los dos números antecedentes, pero empezando con los números 2 y 1:

[2, 1, 3, 4, 7, 11, 18, 29, 47, 76, 123, 199]

La utilizó por primera vez en su obra *Perception* (1983), donde siete instrumentos de cuerda son grabados a lo largo de la obra y posteriormente esa misma grabación se

reproduce junto con los instrumentos tocando, pero intercalada por pausas. Cada vez que se repite la grabación, esta se hace más larga y de acuerdo con la serie de Fibonacci: 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55 compases. Así como en *In the beginning was the Rhythm* (1984), también relaciona la duración de las frases, el número de notas de cada frase y el tamaño de las frases en compases con la serie de Fibonacci. En su obra *...heute frueh, kurz vor dem Aufwachen...* (1993) sin embargo, Gubaidulina da una gran importancia a la serie de Lucas, donde la utiliza para determinar toda la estructura y, por lo tanto, la duración de la obra.



**Fig. 7.** Esquema de la estructura de la obra “...heute frueh, kurz vor dem Aufwachen...” de Sofia Gubaidulina (Tsenova, 2002, p. 257).

En el esquema estructural arriba expuesto en la figura 7, se puede notar que los números 11 y 18 interrumpen siempre las secciones de 47 compases:

- Antes de climax:  $47 + 47 + 11 + 47$
- Después del climax:  $18 + 47$
- El total de compases son 217 que es la suma de  $[(47 \times 3) + 11] + [(47 \times 1) + 18] = 217$  (Tsenova, 2002, pp. 253 – 261).

Podemos ver como todos esos números provienen de la serie de Lucas:

[2, 1, 3, 4, 7, 11, 18, 29, 47, 76, 123, 199]

El estudio n.º 1 *Désordre* para piano de György Ligeti, escrito en 1985, tiene una clara jerarquía cuanto a su construcción de forma sistemática y al superponer patrones rítmicos. La estructura es bastante sencilla, sin embargo, el compositor asigna a cada mano partes independientes que comparten a su vez una subestructura: la mano izquierda toca solamente las teclas negras y la mano derecha, las blancas; utilizando una armadura de clave únicamente en el pentagrama inferior. A la vez, en esa subestructura, las dos manos comparten un pulso constante de corcheas. Para complementar esa estructura y subestructura, las dos manos tocan sus patrones con movimientos ascendentes, pero están completamente desvinculadas en el aspecto métrico. Eso, a su vez, genera el desplazamiento constante de la barra de compás entre las dos manos que definen, al mismo tiempo, la dimensión métrica del patrón que representa.

dédiée à Pierre Boulez  
Étude 1: Désordre

György Ligeti

Molto vivace, vigoroso, molto ritmico,  $\text{♩} = 63$

\*) Use the pedal sparingly throughout.  
Play the melody legato in both hands.

\*) Stets sparsamer Gebrauch des Pedals.  
Die Melodie in beiden Händen legato.

**Fig. 8.** Primeros compases de “Étude 1 : Désordre” de György Ligeti (Ligeti, György. *Études pour Piano - Premier livre*. 1985. Mainz: Schott music - ED 7989. Edición).



Para ello, esos patrones están contruidos en las dos manos de la siguiente manera:

Melódicamente, las escalas se constituyen a partir del grado de la misma indicado en la siguiente tabla:

Mano derecha: (Notas negras y negras puntuadas) 26 notas, 14 compases:

Frase a: si si do si re do la

Frase a': la la re do mi re sol

Frase b: re re fa mi sol fa la si mi re la sol

Mano izquierda: (Notas negras y negras puntuadas), 33 notas, 18 compases:

Frase a: re# re# fa# re# sol# sol# re#

Frase a': fa# fa# sol# fa# la# la# do#

Frase b: fa# fa# sol# sol# re# do# sol# fa# re# do# la# sol# fa# do# re# sol# la# sol# re#

Esas notas se combinan con la tabla abajo, que indica la duración de esas escalas en número de corcheas:

Mano derecha:

Mano izquierda:

Ciclo 1:	a: 3535537	3535538
	a': 3535537	3535538
	b: 353553345335	35355335533535538
Ciclo 2:	3534538	3535538
	3534538	3535538
	353453355334	35355335533535538
Ciclo 3:	3535537	3535538
	3535537	3535527
	353553345335	3434422442232313314
Ciclo 4:	3534527	1312213
	2424425	1212213
	232331133113	1212211221121212213
Ciclo 5:	1212213	1312213
	1212213	1212213
	121221122112	1212211221121212212
	...	...

La combinación de estas dos tablas constituye la forma de los patrones y sus tesituras, que se desarrollan por ciclos, transponiendo diatónicamente las escalas iniciales, una vez en la mano derecha y dos veces en la izquierda (Edwards, 2011, p. 58).

Tom Johnson desarrolla en el cuarto movimiento de su *Movements* para quinteto de vientos (1980) una regla de transformación que en matemáticas se define como autómatas celulares; que a su vez son «máquinas de estados matemáticos finitos, que cambian el estado de sus células paso a paso. Cada célula tiene un valor  $p$  de estados posibles, representados por los números 0, 1, ...,  $p$ . El autómata es unidimensional cuando sus células están sencillamente alienadas como en una cadena» (Peitgen, Jürgens and Saupe, 2004, p. 383).

La regla de transformación que utiliza Tom Johnson en su quinteto de vientos es:

$$n \rightarrow n, n+1$$

que empieza con 1, 2 la cual se desarrolla de esta manera:

Nivel 1: 1, 2

Nivel 2: 1 2, 2 3

Nivel 3: 1 2 2 3, 2 3 3 4

Nivel 4: 1 2 2 3 2 3 3 4, 2 3 3 4 3 4 4 5

etc.

Tom Johnson aplica esa regla en una escala cromática ascendente, en la que cada instrumento la desarrolla en una velocidad diferente, siendo que el fagot el más lento y la flauta, en el nivel 5 de la transformación, 32 veces más rápida. Solamente en la última semicorchea de cada compás, todos los instrumentos tocan la misma nota (Johnson, 2006, p.11).

El resultado musical de esta técnica sería:



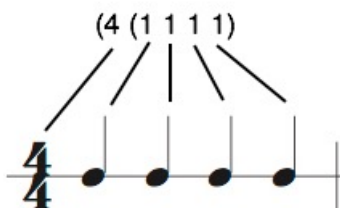
**Fig. 9.** Primeros tres compases del cuarto movimiento de la obra “Movements” para quinteto de vientos de Tom Johnson (Johnson, Tom. *Movements for wind quintet* (1980). París: Edition 75. Edición).

Brian Ferneyhough utiliza en su *Trío de cuerdas* (1995) un sistema para la generación de ritmos complejos que desarrolló en su época en el IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) en París, donde trabajó con Mikhail Malt, compositor brasileño que pertenece en ese instituto y le ayudó a desarrollar en el *software* PatchWork (un sistema visual basado en el lenguaje lisp), capaz de producir estos complejos ritmos en términos de cantidad y velocidad (Malt, 1998, pp. 61-106). Para ello, Ferneyhough utiliza una notación tal de esos ritmos que pueda ser comprendida, así como introducida fácilmente en un ordenador, desarrollada por Mikael Laurson y Mika Kuuskankare en la Academia Sibelius:

(4 (1 1 1 1))

Esa notación tiene dos componentes: contador de tiempos y lista rtm. El contador de tiempos (primer número después del primer paréntesis) define cuántas unidades de tiempo contiene el ritmo o compás; mientras que la lista rtm (los siguientes números posteriores al segundo paréntesis) está constituida por valores de proporción que indican tres parámetros: la suma de todos los valores de esa misma lista; el tamaño de esa misma lista y los valores de los diferentes números. La suma de la lista rtm (de todos sus valores) nos indica el número de pulsaciones en el cual el contador de tiempo debe ser dividido. El tamaño de la lista rtm nos indica el número de notas que constituye el ritmo dentro de esas pulsaciones y finalmente los valores numéricos indican cuantas de esas

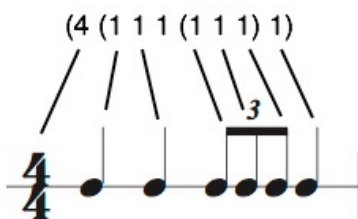
pulsaciones deben de ser asignadas a la nota correspondiente (Laurson, 1996, p. 2). Para que entendamos mejor el sistema, empecemos con su representación de un ritmo de cuatro negras, una por tiempo, en un compás de 4/4:



Otro ejemplo para que se entienda mejor esta notación sería:

(4 (1 1 1 (1 1 1) 1)

En este ejemplo, seguimos teniendo cuatro tiempos en el ritmo, donde el tercer ritmo tendría una subdivisión de tres tiempos iguales, lo que generaría el siguiente ritmo:



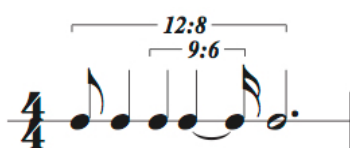
El ejemplo siguiente es parte de los ritmos creados por Ferneyhough en su *Trío de cuerdas*:

(4 (1 2 (3 (4 5)) 6))

Lo que se puede notar aquí, a parte de la existencia de más paréntesis que en los ejemplos anteriores, es que nuestro compás sigue siendo de cuatro tiempos, pero Ferneyhough construye una secuencia de números del uno al seis, separándolos por dichos paréntesis. Aquí lo que ocurriría es que se sumarían los números de pulsaciones dentro de estos cuatro tiempos, o sea, la suma de los números que no están subdivididos con un paréntesis añadido (1, 2, 3 y 6) con un resultado de 12 pulsaciones dentro de cuatro tiempos. Para poder insertar esas doce pulsaciones, se establece la pulsación como corchea, abriendo un brazo superior de 12:8:



Establecida esta primera subdivisión y el valor de la pulsación (corchea = 1:12), se incrementa el ritmo, o sea, el primer 1 sería una corchea (1:12), el dos subsecuente sería una negra (2:12) y el tres sería una negra con puntillo (3:12). Sin embargo, ese tercer tiempo está subdividido en dos, con los números cuatro y cinco. Eso significa que, dentro de un espacio de negra con puntillo (3:12), existe una subdivisión de dos ritmos. Para ello, como en el procedimiento anterior, se suma el valor de esas dos subdivisiones para estipular cuantos pulsos hay dentro de esa negra con puntillo ( $4 + 5 = 9$ ). Se abre un brazo superior con una subdivisión de la negra con puntillo en semicorcheas para poder cuadrar entonces esas nueve pulsaciones, terminando con un brazo superior de 9:16. La última pulsación de nuestro compás lleva el número seis, con lo cual serían seis corcheas, que equivalen a una blanca con puntillo (Andreyev, 2017). El ritmo final sería:

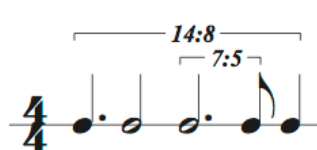
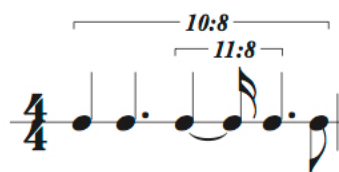


Para generar más ritmos y utilizarlos en su *Trío de cuerdas*, Ferneyhough utiliza una sencilla rotación de los números dentro de los paréntesis como los siguientes:

2. (4 (2 3 (4 (5 6)) 1))

3. (4 (3 4 (5 (6 1)) 2))

4. (4 (4 5 (6 (1 2)) 3))



5. (4 (5 6 (1 (2 3)) 4))

6. (4 (6 1 (2 (3 4)) 5))



Así se genera una cantidad enorme de ritmos complejos típicos en su obra que, vista la complejidad de hacerlos a mano, solo se hace posible a través de la asistencia de un ordenador, dada la experimentación con la rotación y todo lo que puede surgir.

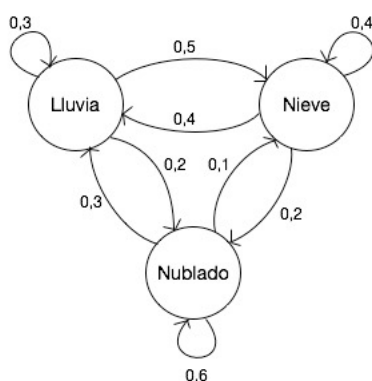
## 1.2. Otros métodos frecuentes

### 1.2.1. Cadenas de Markov

Las cadenas de Markov están basadas en variables aleatorias dependientes de un espacio de tiempo. Su nombre proviene del matemático ruso Andrey Andreyevich Markov (1856 - 1922), quien a partir del 1906 publicó los primeros trabajos sobre ello.

Las cadenas de Markov son un proceso estocástico. Los procesos estocásticos son utilizados para describir una secuencia de eventos aleatorios que dependen de un parámetro de tiempo ( $t$ ) y, por lo tanto, utilizan cálculos de probabilidad y estadísticas. Al estar establecidos por eventos serán considerados cadena, cuando el número de estos eventos sea contable. En una cadena estocástica, a todo espacio de tiempo ( $t$ ) está asignado una variable ( $x$ ) y el evento siguiente o futuro depende inmediatamente del evento presente o estado actual. Están representadas normalmente por un «gráfico de transiciones de eventos» o por una «matriz de transiciones» donde las probabilidades de que un futuro evento ocurra están apuntadas y sirven de base para los cálculos. El total de todas las probabilidades siempre tiene que ser igual a 100 %.

Las cadenas de Markov son muy utilizadas en la previsión meteorológica, así que estableceremos inicialmente un ejemplo en esa área específica para luego hacer una transición a un ejemplo musical:



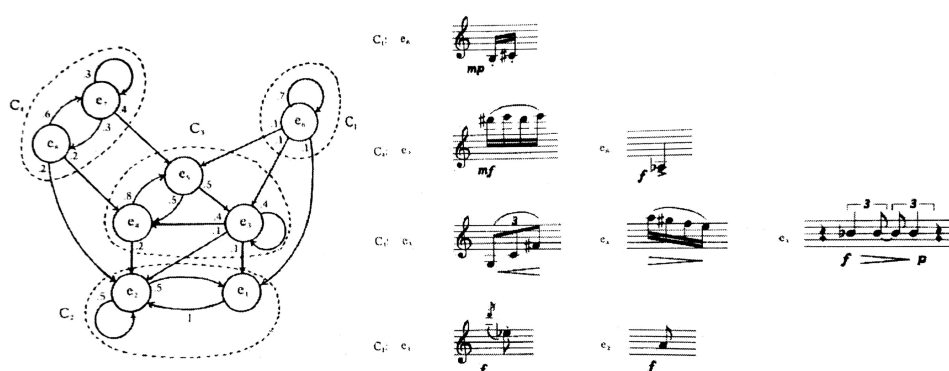
**Fig. 10.** Esquema de interacción con probabilidades en una cadena de Markov.

	Lluvia	Nieve	Nublado
Lluvia	0,3	0,5	0,2
Nieve	0,4	0,4	0,2
Nublado	0,3	0,1	0,6

**Tabla 1.** Probabilidades correspondientes a la cadena de Markov arriba descrita.

Analizando los gráficos arriba expuestos, podemos ver cómo se efectuaría la previsión de tiempo para el día siguiente. Digamos que las probabilidades han sido ya establecidas a través de una estadística preliminar basada en el estudio de las masas de aire, movimientos de nubes, temperaturas anteriores, etc. Posteriormente, se dibujarán los gráficos donde se otorgan dichas probabilidades. Supongamos que hoy esté lloviendo, observamos los dos gráficos y podemos constatar que la probabilidad de que mañana llueva otra vez es de un 30 % (0,3), de que mañana nieve es del 50 % (0,5) y de que el cielo esté nublado, el 20 % (0,2). Si sumamos todas esas probabilidades ( $0,3 + 0,2 + 0,5$ ) constatamos que el resultado sería 1 o sea, el 100 %. Digamos entonces que al día siguiente nieva: la probabilidad de que pasado mañana llueva es del 40 %, de que nieve otra vez es igualmente del 40 % y de que esté nublado es del 20 %. Y así constantemente, formando una cadena de sucesiones climáticas en el tiempo de 24 horas y con las probabilidades establecidas en los gráficos (Nierhaus, 2009, pp. 67-69).

Una vez comprendido el sistema anteriormente expuesto, ejemplificamos ese proceso haciendo una comparación con su aplicación en la música, exponiendo con ese fin el modelo de Kevin Jones, para la generación de frases musicales con una cadena de Markov con diferentes grupos de eventos relacionados a compases musicales:



**Fig. 11.** Cadena de Markov relacionada con compases musicales. Copyright © 1993 del Instituto de tecnología de Massachusetts (Nierhaus, 2009, p. 76).

Los diferentes grupos están señalados por líneas discontinuas y contienen uno o más eventos, los cuales representan los compases expuestos al lado (e1 a e8). El grupo C1 presenta el primer compás arriba del todo como evento único, el grupo C2 los dos compases abajo y así consecutivamente. Los eventos están conectados entre sí, pudiendo de esa manera saltar de un grupo al otro. Las probabilidades están representadas por números y pueden ser manipuladas de acuerdo con la voluntad del compositor para que los eventos se repitan más o menos veces. Suponiendo que los compases fueron previamente compuestos, esa estructura actúa únicamente en la distribución de los mismos en una frase, obteniendo resultados como este:



**Fig. 12.** Resultado de la iteración de la cadena de Markov arriba dibujada y su debida relación con los compases expuestos. Copyright © 1993 del Instituto de tecnología de Massachusetts (Nierhaus, 2009, p. 76).

Este es un simple ejemplo de la utilización de las cadenas de Markov en la composición musical. Otros ejemplos más complejos serán expuestos en el apartado 1.7. analizando métodos personales de su utilización en una obra musical.

### 1.2.2. Sistema de Lindenmayer

El sistema de Lindenmayer o L-System recibe su nombre por el botánico Aristid Lindenmayer (1925-1989) quien desarrolló un lenguaje formal para representar el crecimiento de las algas en 1968. Es un sistema de repetición de células gráficas, donde el axioma (secuencia inicial) se reescribe de forma recursiva, utilizando un conjunto de reglas de producción definidos por:

$$G = (V, \omega, P)$$



Donde:

- «V» es el alfabeto: un conjunto de símbolos que pueden ser sustituidos (variables) y los que no pueden ser sustituidos (constantes).
- «ω» es el iniciante: un grupo de símbolos de «V» que determinan el estado inicial del sistema.
- «P» es un conjunto de reglas de producción que definen como las variables pueden ser reemplazadas por combinaciones entre variables y constantes. Una producción formada por dos cadenas: antecedente y consecuente.

Para entender mejor cómo funciona el sistema, proporcionamos el ejemplo original para representar el crecimiento de algas:

**Variables:** A B

**Constantes:** ninguna

**Axioma:** A

**Reglas:**  $(A \rightarrow AB)$ ,  $(B \rightarrow A)$

Como resultado, tenemos:

$n = 0$  : A

$n = 1$  : AB

$n = 2$  : ABA

$n = 3$  : ABAAB

$n = 4$  : ABAABABA

$n = 5$  : ABAABABAABAAB

$n = 6$  : ABAABABAABAABABAABABA

$n = 7$  : ABAABABAABAABABAABAABABAABAABABAABAAB

Como coincidencia, si contamos el número de elementos que se va obteniendo en cada sucesión, se forma la serie de Fibonacci: [1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55...].

Traspasando el sistema a un ejemplo en el plan gráfico, tenemos las siguientes reglas:

**Constantes:** + − [ ]

**Axioma:** F

**Reglas:**  $F \rightarrow F[+F]F[-F]F$

**Ángulo:** 25.7°

$n = 1 : F[+F]F[-F]F$

$n = 2 : F[+F]F[-F]F[+F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[-F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F$

etc.

Donde F quiere decir «dibujar hacia delante», «+» girar a la izquierda, «-» girar a la derecha. Los corchetes «[ ]» son utilizados para guardar los valores de posición y ángulo.



**Figs. 13 a 16.** Iteraciones 1 a 4 del sistema arriba descrito para la percepción paso a paso de su construcción gráfica.<sup>3</sup>

Desglosemos los movimientos para su mejor comprensión, empezando con la primera figura. El axioma es F que es equivalente a  $n = 1$ , o sea  $F[+F]F[-F]F$ . Si observamos la primera figura, vemos que hay cinco segmentos formando la figura. Desde abajo hacia arriba, F, una curva hacia la izquierda que es representada por el  $[+F]$ , o sea, que los paréntesis indican un desvío, pero la línea anterior sigue con el F posterior que no está entre paréntesis. Otro desvío entre paréntesis hacia la derecha y la línea sigue con el F posterior. En la siguiente iteración  $n = 2$ , como podemos observar en la segunda figura, se sustituye cada F, o sea, cada uno de los cinco segmentos, por  $F[+F]F[-F]F$ , introduciendo como consecuencia la primera figura en escala menor en cada uno de esos segmentos obteniendo un total de 25 segmentos más pequeños y así, consecutivamente, formando el gráfico de una especie de planta o vegetación.

Un ejemplo musical que contiene la utilización de ese sistema es el utilizado por Przemyslaw Prusinkiewicz con una sencilla interpretación de un gráfico hecho por el sistema de Lindenmayer que utiliza un tipo de curva llamada Hilbert. Las notas son representadas por los segmentos horizontales, que determinan el grado dentro de una escala de Do Mayor y su duración está determinada por la longitud de esos segmentos. Los números dentro de los segmentos indican la sucesión de esos eventos:

<sup>3</sup> Creado on-line en la dirección web: [https://jsxgraph.uni-bayreuth.de/wiki/index.php/Plant\\_generation\\_II](https://jsxgraph.uni-bayreuth.de/wiki/index.php/Plant_generation_II). Visitado: 16/08/2019.

**Iteraciones:** 3

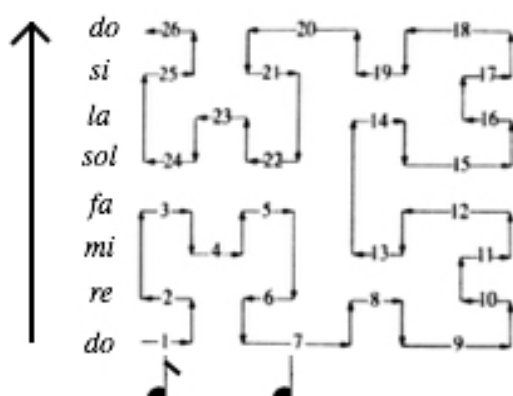
**Ángulo:** 90°

**Axioma:** -X

**Reglas:**

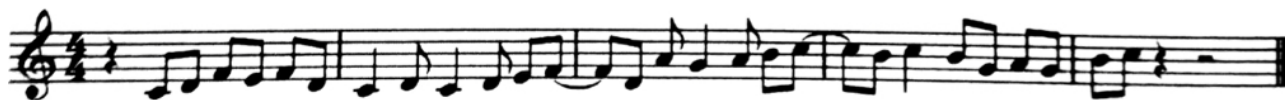
$X \rightarrow -YF+XFX+FY-$

$Y \rightarrow +XF-YFY-FX+$



**Fig. 17.** Esquema musical utilizando la curva de Hilbert (Nierhaus 2009, pp. 148).

El resultado musical sería:



**Fig. 18.** Resultado musical de la utilización del sistema de Lindenmayer de la fig. 17.

### 1.3. El tratado de Schillinger

Joseph Moiseyevich Schillinger (1895-1943) nació en Ucrania y emigró a Estados Unidos a principios del siglo XX. Estudió composición en el Conservatorio de Música de San Petersburgo y trabajó en Estados Unidos posteriormente, no solamente como compositor, pero como profesor de composición, y algunos de sus alumnos fueron nombres importantes como los de George Gershwin, Glenn Miller y Henry Cowell, entre otros. Utilizaba expresiones matemáticas para describir arte, arquitectura y música obviamente; y como teórico musical, desarrolló a lo largo de toda su vida un método extremadamente extenso para composición musical con matemáticas, conocido como *The Schillinger System of Musical Composition*.

El método se divide en dos volúmenes con un total de 12 libros:

Volumen I		Volumen II	
<b>Libro I</b>	Teoría del ritmo	<b>Libro VIII</b>	Formas instrumentales
<b>Libro II</b>	Teoría de las escalas	<b>Libro IX</b>	Teoría general de la armonía
<b>Libro III</b>	Variación de la música a través de proyecciones geométricas	<b>Libro X</b>	Evolución de las familias de las notas musicales
<b>Libro IV</b>	Teoría de la melodía	<b>Libro XI</b>	Teoría de la composición
<b>Libro V</b>	Teoría de la armonía	<b>Libro XII</b>	Teoría de la orquestación
<b>Libro VI</b>	La correlación entre armonía y melodía		
<b>Libro VII</b>	Teoría del contrapunto		

**Tabla 2.** Esquema de organización de los dos volúmenes del método de Schillinger.

Vista la extensión de su método, vamos a hablar únicamente sobre algunos principios y sistemas que se relacionan con la composición algorítmica y que sirven de ejemplo para resumir un poco las ideas principales del método de Schillinger y más específicamente del libro a que se refiere.

### 1.3.1. Libro I: Teoría del ritmo

El libro uno trata sobre la construcción de estructuras rítmicas y un sistema que combina una base matemática con procesos de crecimiento evolutivo para crear diferentes patrones rítmicos.

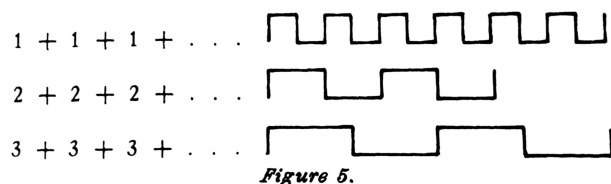
Antes de entrar en estos procesos, vale la pena definir el concepto de representación geométrica de la música que Schillinger utilizará a lo largo de todo el método.

Schillinger defiende la utilización de gráficos tan sencillos como una forma de onda en diversas áreas de la actuación o estudios humanos como la bolsa o la medicina, donde el eje horizontal expresa tiempo y el vertical otro factor como intensidad o frecuencia. Con eso, defiende la objetividad del empleo de los gráficos y la aplica de una manera muy obvia para la representación de periodos musicales:



**Fig. 19.** Gráfico de representación de periodos musicales.

En la figura 19 la línea horizontal representa, como antes dicho, el tiempo, y la vertical, el ataque del periodo, la frecuencia. La siguiente figura (20) representa como ejemplo diferentes periodos; el primero con un ataque constante por pulso, el segundo un ataque a cada dos pulsaciones y el tercer respectivamente, a cada tres pulsaciones:



**Fig. 20.** Representación gráfica de diferentes pulsaciones según Schillinger (Schillinger, 2004, Vol. I, Book I - p. 3).

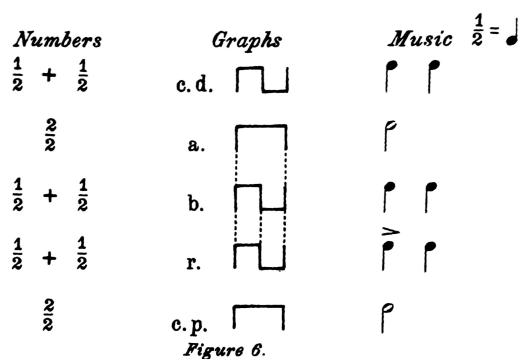
### 1.3.1.1. Interferencias entre periodicidades

Las interferencias entre periodicidades son ritmos resultantes de la combinación entre dos periodos isorítmicos (3, 3, 3, 3 por ejemplo combinado con un 4, 4, 4, 4). Schillinger define el ritmo que contiene valores más grandes como generador mayor y el de valores más pequeños, generador menor. Para hacer una sincronización binaria entre esos ritmos, siempre según Schillinger, es necesario:

1. Encontrar el *producto común* (c.p.) o el *denominador común* (c.d.)
2. Definir el *factor complementario*, donde el factor *complementario* de:

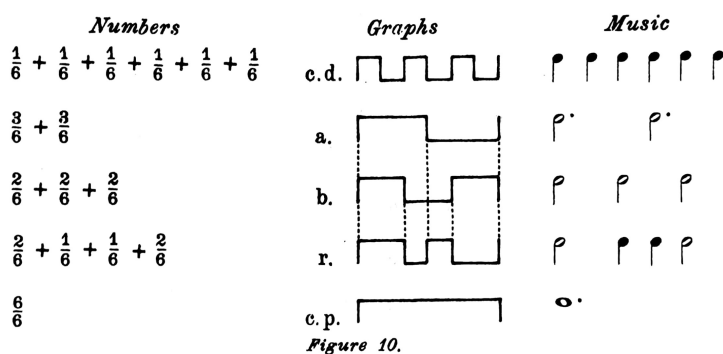
$$a \text{ es: } \frac{ab}{a} = b \quad \text{y de } b \text{ es: } \frac{ab}{b} = a$$

Después de definir estos parámetros, es necesario trazar un gráfico con ambos generadores sincronizados verticalmente. Para encontrar la resultante (r), debemos trazar líneas perpendiculares por todos los puntos de ataque de ambos generadores y la resultante se descubre a través de esas líneas. Se añade posteriormente el producto al diagrama y el valor numérico de la resultante es indicado. Se traspasa entonces todo el diagrama a una notación musical (Schillinger, 2004, Vol. I, Book I, p. 4).



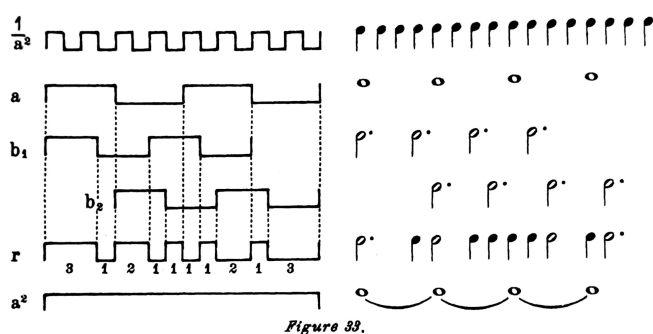
**Fig. 21.** Gráfico de generadores rítmicos sincronizados verticalmente (Schillinger, 2004, Vol. I, Book I, p. 5).

Adjuntamos otro ejemplo, ahora un poco más complejo, del mismo proceso de generación rítmica por interferencia entre dos generadores binarios:



**Fig. 22.** Gráfico de generadores rítmicos sincronizados verticalmente (Schillinger, 2004, Vol. I, Book I, p. 7).

Para obtener más variedad rítmica o ritmos aún más complejos, Schillinger propone la técnica de *fraccionar* los ritmos generadores, donde, aunque utilizando solamente dos generadores primarios, consigue superponer tres ritmos diferentes, como en la figura 23 :



**Fig. 23.** Gráfico de generadores rítmicos sincronizados verticalmente (Schillinger, 2004, Vol. I, Book I, p. 7).

Podemos observar en el ejemplo anterior cómo Schillinger utiliza dos ritmos generadores,  $a = 4$  y  $b = 3$ , notados musicalmente como  $a =$  redonda y  $b =$  blanca puntuada. En la figura 23 ejemplifica con otras subdivisiones o multiplicaciones del valor de  $a$ , aunque no interfieren en la producción de la resultante; como en la primera y últimas líneas, donde expone  $1/a^2 = 16$  negras en notación musical y  $a^2 = 4$  blancas ligadas entre sí. Los ritmos que interfieren entre sí son  $a$ ,  $b_1$  y  $b_2$  estos equivalentes a  $b$  únicamente desplazados entre sí a lo largo del ritmo  $a$ .

Con eso consigue, como antes dicho, una superposición de tres ritmos diferentes y una resultante ( $r$ ) bastante más compleja y diversificada. Como resultado final y de cara a utilizar esa resultante musicalmente, se puede trazar la barra de compás encajando el ritmo resultante en diversas fórmulas de compás, al dividirlo por ejemplo en un  $3/4$  o  $6/8$ .

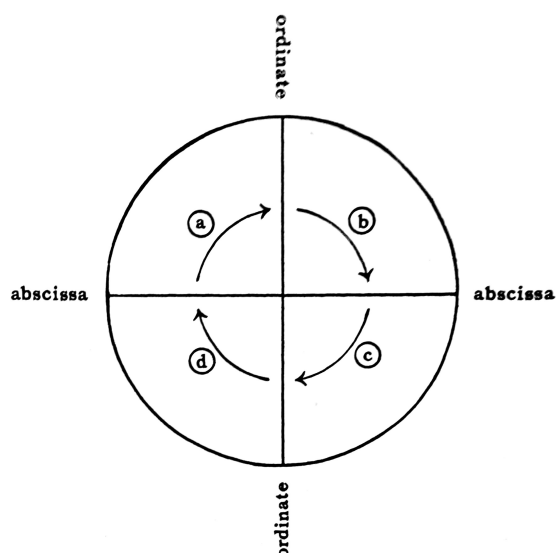
### **1.3.2. Libro III: Variación de la música a través de proyecciones geométricas**

Schillinger dedicó un libro entero (libro tres) para describir técnicas para la generación de material composicional a través de proyecciones geométricas. Las dos primeras técnicas que describe, es la de la inversión y rotación de intervalos musicales, así como su expansión horizontal y vertical. Algunas ideas que están incluidas en este libro son extensiones de técnicas tradicionales como la inversión melódica, pero desde un punto de vista visual antes que musical.

#### **1.3.2.1. Inversiones geométricas**

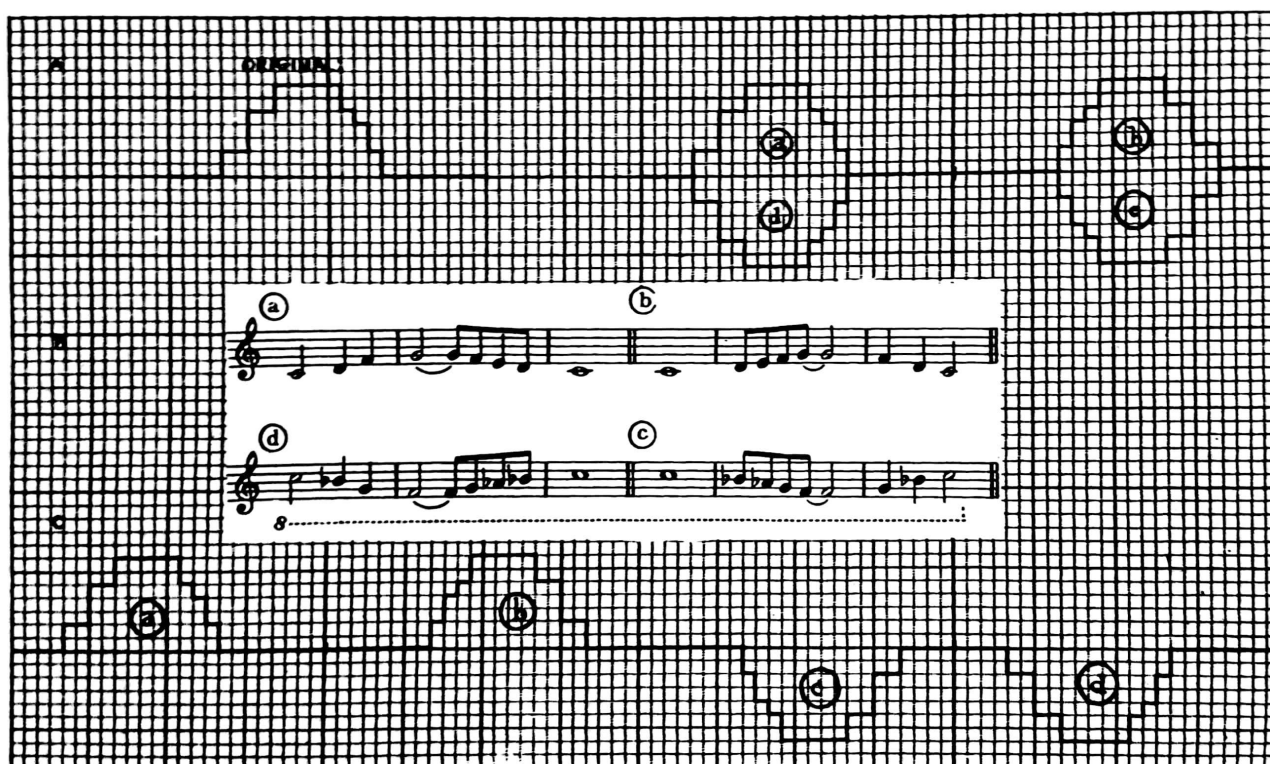
Schillinger propone a las inversiones geométricas como técnica para generar material melódico a partir de una melodía existente. Para ello, elabora cuatro posibilidades: la posibilidad A, es la melodía original; la posibilidad B, la melodía con una rotación de  $180^\circ$ , o sea, la melodía al revés, del final hacia el principio; para la posibilidad C, propone una rotación vertical sobre su abscisa también en  $180^\circ$ , o sea, la inversión de los intervalos de la melodía original; la última posibilidad sería la D, donde se aplicaría esa misma rotación sobre la abscisa, esta vez con la melodía generada con la posibilidad B.

Para que se entienda mejor esas proyecciones, Schillinger expone el siguiente gráfico:



**Fig. 24.** Gráfico de inversiones geométricas para generar material melódico según el método descrito por Schillinger (Schillinger, 2004, Vol. I, Book III, p. 187).

Schillinger presenta a posteriori un ejemplo musical donde aplica la técnica de inversiones geométricas a partir de una melodía y proyecta esas inversiones en un gráfico para la mejor visualización del proceso:



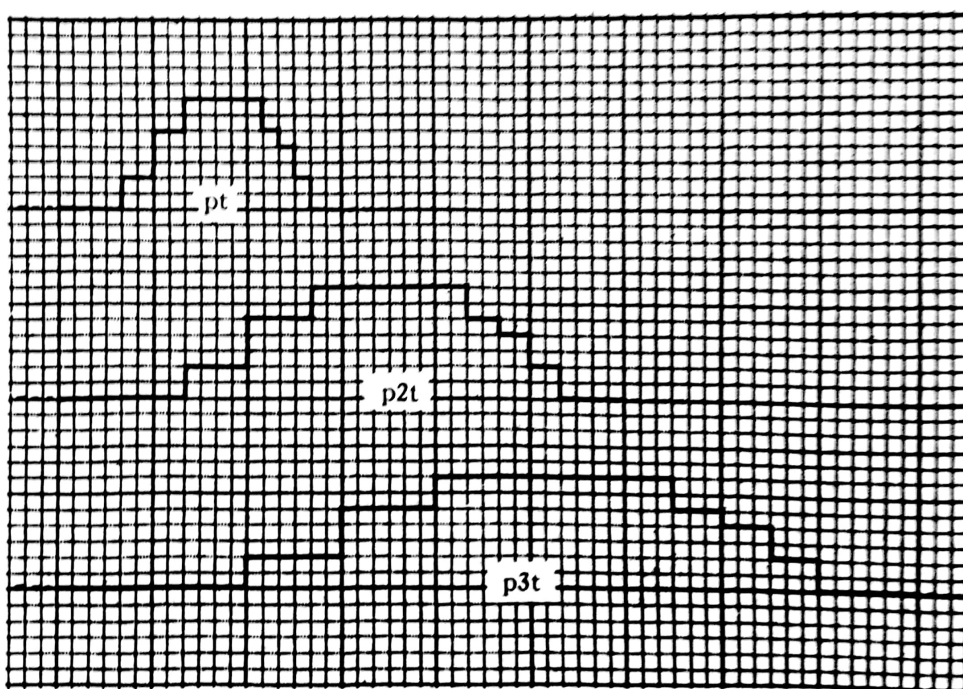
**Fig. 25.** La evolución de las cuatro inversiones geométricas sobre una melodía establecida (Schillinger, 2004, Vol. I, Book III, p. 188).



Como aplicación dentro de la composición, Schillinger propone el desarrollo de la melodía original a través de unir el material generado por este proceso en cualquier tipo de combinación (A D B C, A C D B, etc.) y comenta el caso de Gershwin como ejemplo, donde utiliza una inversión en lugar de la melodía original dentro de su obra *Porgy & Bess*, visto que esa se adaptaba mejor al carácter deseado por el compositor.

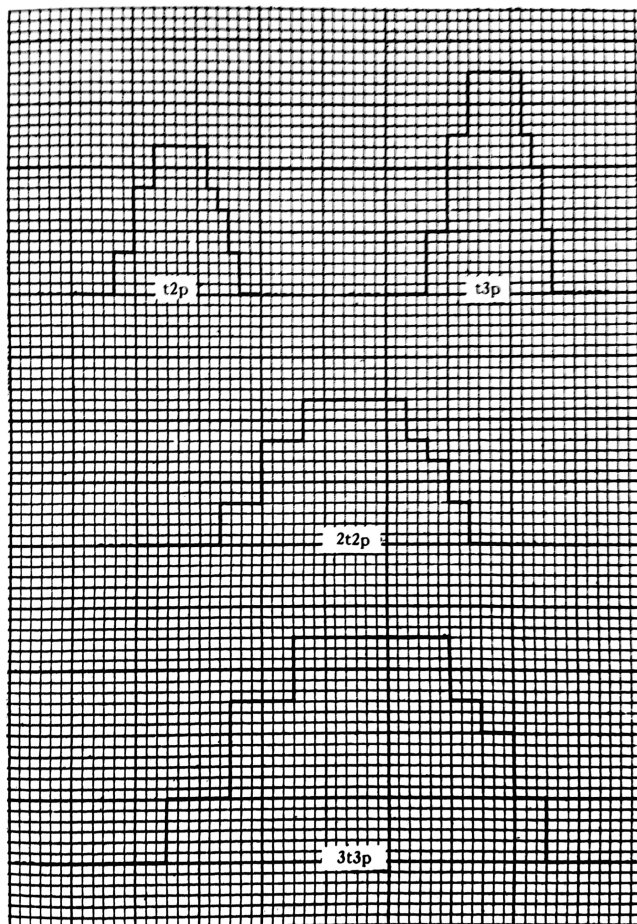
### 1.3.2.2. Expansiones geométricas

Las expansiones geométricas son, como en las inversiones, aplicadas a una melodía existente, generando así material melódico derivado de dicha melodía. Para ello, dicha extensión puede ser hecha en ambos sentidos, horizontal y vertical, donde el sentido horizontal se refiere al tiempo y el vertical, a los intervalos. Utilizando el lenguaje gráfico antes descrito, cada intersección horizontal de la cuadrícula representa un semitono y cada intersección vertical una corchea. Schillinger denomina esas unidades  $p$  (*pitch* en inglés) para intervalos y  $t$  para tiempo. Si expande uno de esos dos factores geométricos de una melodía, lo multiplicaría por un número entero, o sea,  $2p$  sería una expansión de un tono y  $3p$  de tono y medio; así como  $2t$  sería una negra y  $3t$ , negra puntuada. Al utilizar siempre la geometría, la visualización a través de gráficos es siempre importante en el trabajo de Schillinger, que nos expone el dibujo abajo para mejor comprensión de esa técnica:



**Fig. 26.** Gráfico ejemplificando una melodía original ( $pt$ ) y sus expansiones geométricas (Schillinger, 2004, Vol. I, Book III, p. 212).

En la figura 26, podemos ver cómo Schillinger escribe una melodía en su sistema gráfico, como antes mencionamos, donde esa melodía original está simbolizada por  $pt$ , o sea, intervalos y tiempo originales. En el segundo caso expande el tiempo al doble del original ( $p2t$ ) y en el último lo triplica ( $p3t$ ).



**Fig. 27.** Gráfico ejemplificando una melodía original ( $pt$ ) y sus expansiones geométricas (Schillinger, 2004, Vol. I, Book III, pp. 213).

En la figura 27 podemos ver cómo representa la expansión geométrica de la melodía original ( $pt$ ) en el primer caso doblando los intervalos ( $t2p$ ), triplicándolos ( $t3p$ ) y uniendo los ejemplos anteriores, expandiendo así intervalos y tiempo a la vez ( $2t2p$  y  $3t3p$ ).

El gráfico abajo ilustra los resultados de esa técnica en un ejemplo con notación musical:



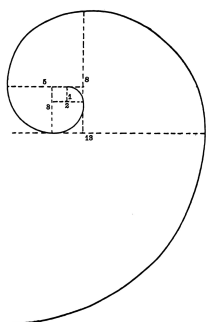
**Fig. 28.** Gráfico ejemplificando una melodía original (*p*) y sus expansiones geométricas, entre dos y cuatro veces los intervalos originales (Schillinger, 2004, Vol. I, Book III, p. 214).

### 1.3.3. Libro IV: Teoría de la melodía

En el libro cuatro, Schillinger desarrolla la representación gráfica de la melodía en muchos sentidos, utilizando su ya mencionada y ejemplificada cuadrícula, donde tiempo *versus* alturas se desarrollan en un espacio horizontal y vertical proporcionalmente. Una de las aproximaciones más cercanas a la composición algorítmica y a los procesos ya anteriormente mencionados se encuentra en el capítulo de utilización de formas orgánicas (capítulo 8), especialmente cuando genera melodías utilizando la ya mencionada anteriormente secuencia de Fibonacci, a la que prestaremos especial atención.

#### 1.3.3.1. Utilización de formas orgánicas en melodías

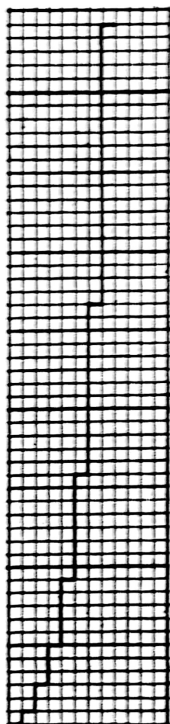
El acercamiento que hace Schillinger a la secuencia de Fibonacci es, en un primer momento, con su gráfico que expresa especialmente su crecimiento proporcional:



**Fig. 29.** Gráfico desarrollado a partir de las proporciones de la secuencia de Fibonacci (Schillinger, 2004, Vol. I, Book IV, p. 332).<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Forma orgánica generada por la secuencia de Fibonacci y por la unión de ángulos de 90° creados por un cuadrado que tiene sus lados con las medidas proporcionales a dicha secuencia.

Posteriormente, Schillinger traspasa esa misma idea de construir una forma orgánica a través de la secuencia de Fibonacci y la traspasa a su tráfico de cuadrículas:



**Fig. 30.** Forma orgánica construida a través de la secuencia de Fibonacci (Schillinger, 2004, Vol. I, Book IV, p. 333).<sup>5</sup>

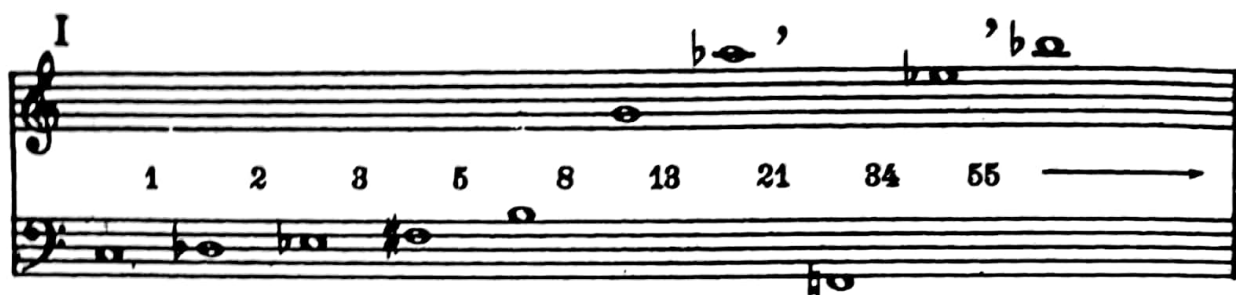
A partir de ahí, traspasa esos valores sencillamente a una notación musical, como lo hizo en los ejemplos que exponemos de sus libros anteriores:



**Fig. 31.** Notación musical del gráfico de la figura 30 (Schillinger, 2004, Vol. I, Book IV, p. 334).

<sup>5</sup> Gráfico que representa números de la secuencia de Fibonacci en un espacio bidimensional (tiempo x alturas de notas).

Vistos los intervalos que genera la secuencia de Fibonacci y su transposición directa a una melodía, Schillinger aprovecha para desarrollar esa melodía de una manera más lineal, ajustando las octavas de la figura anterior:



**Fig. 32.** Transposición musical de algunas octavas de la melodía expuesta en la figura 31 generando tres diferentes y posibles melodías (Schillinger, 2004, Vol. I, Book IV, p. 334).

### 1.3.3.2. Conclusión

A pesar de que el método de Schillinger es obviamente bastante más extenso de lo que fue expuesto en este apartado, la intención es relacionar directamente lo más interesante, y a la vez relevante, a esta investigación, con lo que se ha expuesto únicamente lo que se puede considerar o utilizar como composición algorítmica. El resto de los libros contienen muchísima información relevante musicalmente, pero nos abstenemos de analizarlo con más atención por su extensión, vista su distancia con el tema de esta investigación. Al método de Schillinger se podría dedicar una investigación a parte, dada la cantidad de información que contiene.

## 1.4. Iannis Xenakis y la composición estocástica

Iannis Xenakis (1922-2001) es una de las referencias más importantes dentro de la composición algorítmica asistida por ordenador, electrónica y la síntesis no estándar que son objetos de esta investigación. El compositor de origen griego se ejercía profesionalmente tres disciplinas diferentes: música, arquitectura y matemáticas. Estudió ingeniería en la Escuela Politécnica de Atenas y posteriormente trabajó con el arquitecto francés Le Corbusier. Xenakis trabajó con Le Corbusier en el Pabellón Phillips de la Expo Mundial de Bruselas en el año 1958. Los proyectos de ese pabellón le sirvieron como basis e inspiración para lo que él concibe como una de sus primeras composiciones,

*Metastasis*. La definición de composición estocástica nos proporciona el propio Xenakis en su libro *Formalized Music* (Xenakis, 1992, p.4):

La explicación del mundo y como consecuencia la explicación del fenómeno del sonido que nos rodea o sonido que puede ser concebido y beneficiado por el principio de la casualidad (azar). La casualidad es la base para la expansión de la ley de los números extensos. Esa ley es una evolución asintótica<sup>6</sup> hacia un estado de estabilidad, hacia un objetivo (objetivo se traduce a *stochos* en griego). Del objetivo (*stochos*) nace el adjetivo estocástico.

Como aspirante a compositor, Xenakis frecuentó las clases abiertas que impartía Oliver Messiaen en París. Al exponerle a Messiaen su interés en la composición, Messiaen le aconsejó a utilizar tanto matemáticas como sus conocimientos de ingeniería en sus procesos composiciones.

En su *Formalized Music* Xenakis explica muchas de sus ideas hacia la composición así como analiza muchas de sus obras para que el lector pueda comprender como utiliza todos los cálculos que describe.

*Achorripsis* (flujos de sonido en griego) compuesta en 1956-57 y estrenada en Buenos Aires en 1958. Obtuvo otras interpretaciones en Europa y América pero su consagración fue durante el primero Festival Xenakis (monográfico) en la Salle Gaveau en París en el año 1965, interpretada por el Ensemble de Musique Contemporaine y donde fue grabada la que por mucho tiempo fue la única grabación disponible de esta obra. Es una obra que fue probablemente más analizada que interpretada, visto que el mismo Xenakis expone sus ideas composicionales en su libro, aunque no se extiende mucho en ese análisis. Intentaremos aquí analizar y explicar *Achorripsis* desde el mismo libro de Xenakis e intentaremos profundizar en ella un poco más allá de su propio análisis, basándonos en el trabajo de otros compositores.

Obviamente Xenakis tiene muchos más ejemplos e incluso obras más relevantes que *Achorripsis*, pero analizar todo su trabajo no es objetivo en esta investigación, pero si dar un ejemplo concreto de como él, gran precursor de la composición algorítmica del presente la concebía y utilizaba.

*Achorripsis* es una obra para Orquesta de Cámara en la que Xenakis empieza a construir a partir de la distribución Poisson, que es una ecuación para la distribución de

---

<sup>6</sup> adj. Geom. Dicho de una curva: que se acerca de continuo a una recta o a otra curva sin llegar nunca a encontrarla.

probabilidad discreta, que describe la probabilidad de ocurrencia de sucesos con probabilidad pequeña durante un cierto espacio de tiempo y a partir de una frecuencia de ocurrencia media. La fórmula fue descubierta por Simeón-Denis Poisson quien la reveló en 1838 en su trabajo *Investigación sobre la probabilidad de los juicios en materias criminales y civiles*. Es muy utilizada para calcular, como se ha mencionado, sucesos de pequeña o rara probabilidad, como terremotos, tsunamis, etc.

La ecuación de la distribución de Poisson se define por:

$$P_k = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

Donde:

- « $P$ » es la probabilidad de que el suceso ocurra.
- « $k$ » es el número de ocurrencias del evento (0,1,2,3,4,5...).
- « $\lambda$ » es un parámetro positivo que representa la media que se espera que ocurra el evento durante un intervalo de tiempo.
- « $e$ » es el número de Euler, base de los logaritmos naturales ( $e = 2,71828\dots$ ).
- $k!$  es el factorial de  $k$ . Si  $k = 0$  su factorial por definición es igual a 1. Luego  $k = 1$  sería  $1 \times 1$ ,  $k = 2$  sería  $2 \times 1$ ,  $k = 3$  sería  $3 \times 2 \times 1$ ,  $k = 4$  sería  $4 \times 3 \times 2 \times 1$ , etc.

Xenakis empieza la definición de todo el proceso de *Achorripsis* estableciendo de manera arbitraria la media de eventos:

$\lambda = 0.6$  eventos/unidad de tiempo.

Aplicando la fórmula de Poisson con la media definida, se obtiene:

$P_0 = 0.5488$
$P_1 = 0.3293$
$P_2 = 0.0988$
$P_3 = 0.0198$
$P_4 = 0.0030$
$P_5 = 0.0004$

**Tabla 3.** Resultados de la fórmula de Poisson con la media definida anteriormente.

Xenakis elige posteriormente y, de manera igualmente arbitraria, 196 células y aplica las proporciones obtenidas arriba multiplicando las mismas por 196. Obtiene en consecuencia la tabla de valores abajo:

$i$	$P_i = 196$
0	107
1	65
2	19
3	4
4	1

**Tabla 4.** Resultados de la multiplicación de la tabla 3 por 196.

Los resultados del cuadro de arriba los utiliza Xenakis en varias dimensiones. En primer lugar, define el número total de células (196) y luego conecta el resultado anterior con el número de eventos dentro de una célula. O sea, 107 células de silencio (sin ningún evento), 65 células con un único evento, 19 células con dos eventos, cuatro con un triple evento y una con un evento cuádruple. El paso siguiente es dividir los instrumentos de una orquesta de cámara en siete entidades sonoras diferentes: flautas, oboes, glissando de cuerdas, percusión, pizzicato de cuerdas, metales y cuerdas con arco. Lo define como una agrupación de «timbres». Lo que no aclara detalladamente es qué instrumentos en realidad componen cada grupo. Los instrumentos exactos divididos entre los grupos tímbricos serían:

1. Flauta (flautín, clarinete en mi bemol y clarinete bajo).
2. Oboe (oboe, fagot y contrafagot).
3. *Glissando* de cuerdas (violín, chelo y contrabajo).
4. Percusión (xilófono, caja china y bombo).
5. *Pizzicato* (violín, chelo, contrabajo).
6. Metales (dos trompetas y trombón).
7. Cuerdas con arco (violín, chelo, contrabajo).

Hay en total tres violines, tres chelos y tres contrabajos que ejecutan los pasajes de *glissando*, *pizzicato* y arco. Se percibe que Xenakis utiliza en cada grupo tímbrico los extremos de tesitura de los mismos y un instrumento intermedio. Se nota especialmente la



ausencia de violas en las cuerdas que seguramente lo hizo para equilibrar tres clases de instrumentos en cada grupo. Definidos los grupos (7), Xenakis sencillamente divide el número de eventos (196) por el número de grupos, obteniendo una tercera tabla, donde divide las células en unidades de tiempo.  $196/7 = 28$ . 28 son los eventos de tiempo y 7 los timbres establecidos:

<i>Timbre</i>						
Flauta						
Oboe						
Glissando de cuerdas						
Percussion						
Pizzicato						
Metales						
Cuerdas con arco						
	0	1	2	...	28	<i>Tiempo</i>

**Tabla 5.** División esquemática de la obra en células de unidad de tiempo distribuida entre los instrumentos.

Define posteriormente, y de manera igualmente arbitraria, la duración total de la obra: siete minutos. Divide la duración total por el número de eventos para definir la duración de cada célula: 15 segundos. Xenakis inserta esos 15 segundos en un tiempo de metrónomo de 26 MM y como resultado obtiene 6,5 compases por célula.

La estructura de la obra se va formando lentamente, le queda solamente para terminarla dividir todas esas células dentro del cuadro arriba descrito.

Para ello, utiliza otra vez la distribución de Poisson. Toma como ejemplo las células con un único evento, que, como hemos descrito anteriormente, son 65. Divide esas 65 células por las 28 columnas de tiempo y obtiene una media de densidad de 2,2 eventos únicos por célula. Aplica esa densidad en la fórmula de Poisson y obtiene la siguiente tabla:

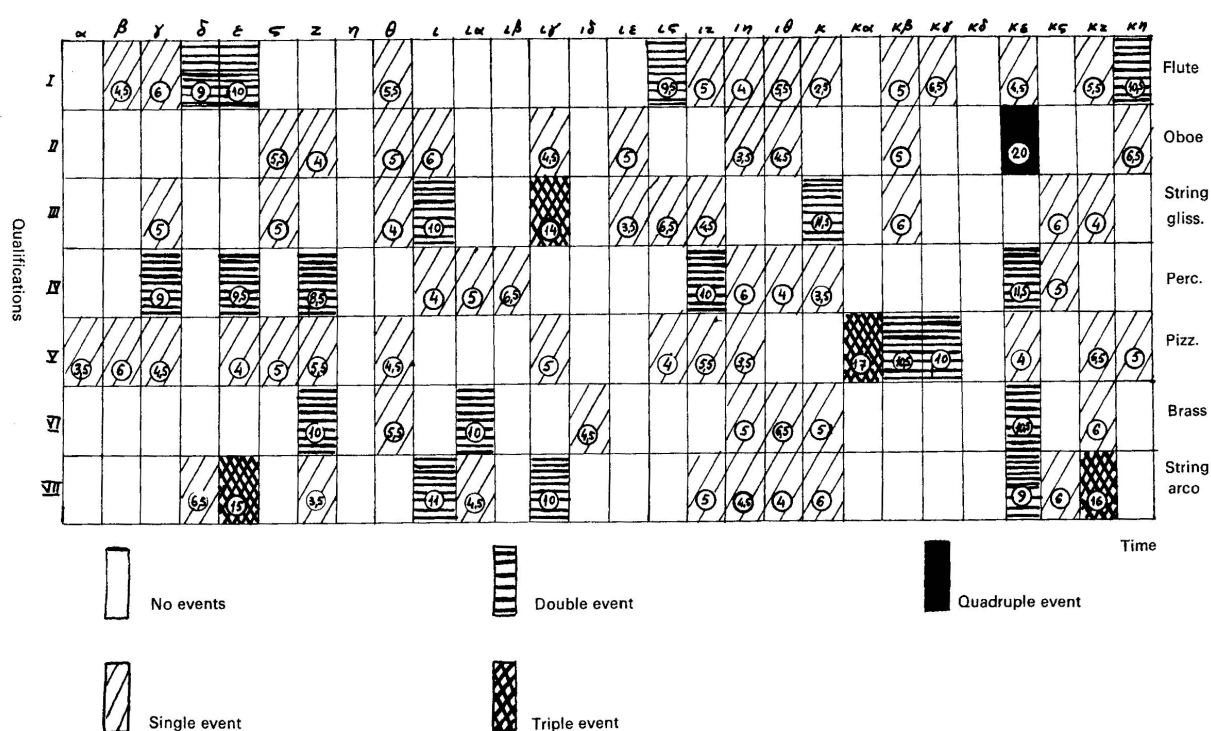
$\lambda = 2,2$  eventos por célula.

Frecuencia $k$	nº de columnas	producto columnas x $k$
0	3	0
1	6	6
2	8	16
3	5	15

4	3	12
5	2	10
6	1	6
7	0	0

**Tabla 6.** Distribución de número de eventos por columna.

Dada la tabla anterior Xenakis sencillamente distribuye los eventos por columna manualmente y teniendo en cuenta las intersecciones verticales, así como diagonales como él mismo describe en su libro. El resultado final de todos los pasos anteriormente descritos es la tabla que él expone en el *Formalized Music*:



**Fig. 33.** Dibujo original de la estructura formal de *Achorripsis* para orquesta de cámara (Xenakis, 1992, p. 28).

Podemos observar en la figura 33, que es la tabla final y estructura formal de *Achorripsis* la aplicación de las tablas adquiridas después de todos los cálculos. Siete líneas que representan los siete timbres, 28 columnas que representan las células temporales y en las que se encuentra los eventos desde nulos hasta cuádruples. Si contamos los eventos, veremos que hay el mismo número de ellos reflejados en la tabla 4 repartidos por columnas como descrito en la tabla 6 dentro de la estructura expuesta en la tabla 5.

Los números apuntados dentro de cada célula son de la media de densidad de los eventos que ocurren dentro de cada compás, comprendido en esa célula. Xenakis

especifica que el límite máximo de sonidos producidos por una orquesta es equivalente a diez sonidos por segundo. Con lo cual, la media sería de 5 sonidos por segundo, lo que supone una relación entre sonidos por segundo y dentro de un compás, estableciendo así la relación de densidad que otorga a cada célula posteriormente, representadas por esos números antes descritos.

Evento	sonidos/ compás. 26MM	sonidos / segundo	media del nº de sonidos/célula
zero	0	0	0
simple	5	2.2	32.5
doble	10	4.4	65
triple	15	6.6	97.5
cuádruple	20	8.8	130

**Tabla 7.** Esquema de la densidad sonora de la obra por compás, segundo y célula.

Lo que determina posteriormente, si observamos la estructura final de la obra, es otorgar densidades próximas a la media de cada evento (simple, doble, etc.) como, por ejemplo, los dos primeros eventos de la segunda columna que son simples y llevan densidades de 4, 5 y 6 respectivamente y alrededor de 5 como expuesto en la tabla 7.

Xenakis no especifica en su libro algunos de los procesos que utilizó para generar alturas, así como intervalos entre estas. Para conocer esos procesos, nos basaremos en el análisis que hizo Edward Childs en *Achorripsis: A sonification of probability distributions* (Childs 2002, pp. 2 - 3).

Para la sucesión de notas (distribución rítmica), Xenakis utiliza las densidades por célula (números circulados dentro de ellas) y lo aplica en una fórmula de distribución exponencial:

$$P_i = e^{-\delta iv} (1 - e^{-\delta v})$$

Donde para  $i = 0, 1, 2$  etc.:

- «v» es el rango de tiempo.
- «P» es la probabilidad de que el tiempo entre eventos caerá dentro del rango «iv».
- «δ» es la densidad de eventos que corresponde al número dentro de las células.

Xenakis utiliza un rango de tiempo de un 0,1 del compás que sería 12/52 segundos para la utilización de esta ecuación.

Para controlar los intervalos entre notas sucesivas, Xenakis utiliza una ecuación de distribución lineal. Este tipo de distribución es muy utilizada para situaciones fuera de un rango temporal:

$$P_i = \frac{2}{n+1} \left(1 - \frac{i}{n}\right) \quad \text{Donde para } i = 0, 1, 2 \text{ etc.:}$$

- «n» *estaría definida por*  $n = g/v$ .
- «g» *sería el intervalo máximo entre notas.*
- «v» *sería el incremento del intervalo.*

Finalmente, para calcular las velocidades de los *glissandos* de cuerdas, Xenakis lo relaciona con la distribución de las velocidades de las moléculas de gas, utilizando una distribución normal para ello, inicialmente calculando la probabilidad de densidad con la existencia de velocidad:

$$f(v) = \frac{2}{\alpha \sqrt{\pi}} e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}}$$

Donde:

- «f» *es la probabilidad de densidad.*
- «v» *es la velocidad.*
- «α» *es la media cuadrada de todas las posibilidades de «v».*

Utilizando todos esos elementos para elaborar cada célula, visualizamos la partitura de los eventos que coinciden dentro de la célula 17 (compases 104-11), para que constatemos todo lo que utilizó para componerla:

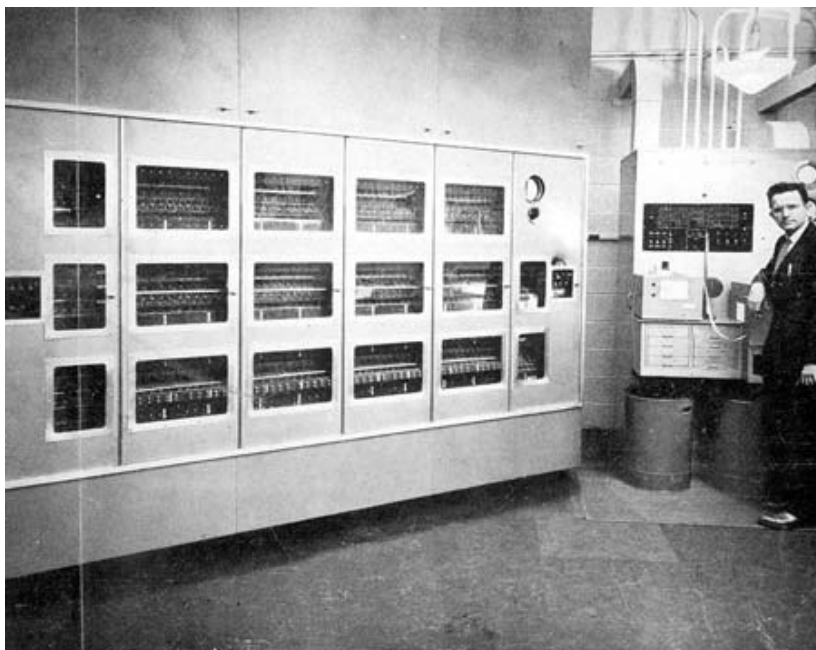
Fig. I-8. Bars 104–111 of *Achorripsis*

**Fig. 34.** Compases 104 - 111 de *Achorripsis* de Iannis Xenakis (Xenakis, 1992, pp. 26 - 27).

Otra observación que cabe hacer después de este análisis es que Xenakis trabajaba todos los cálculos a mano. Su exactitud, sin embargo, es muy alta, vista la dificultad de estas operaciones. El mismo compositor se refiere a «meses de cálculos» para conseguir llegar a un resultado eficaz y utilizable en una composición musical. A raíz de este problema, el mismo Xenakis empezó a buscar soluciones, utilizando ordenadores de la época para ayudarle con dichos cálculos. Esta necesidad se hizo cada vez más grande hasta llegar al concepto de composición algorítmica asistida por ordenador, que será objeto de análisis en el próximo apartado de esta investigación.

### 1.5. Composición algorítmica asistida por ordenador

La primera composición completamente generada por un ordenador a nivel simbólico, o sea, utilizando el ordenador para cálculos, así como para generar material compositivo, fue la *Illiac Suite* compuesta por Lejaren Hiller y Leonard Isaacson, entre los años 1955 y 1956. Recibió dicho nombre en referencia al ordenador *Illiac* instalado en la Universidad de Illinois - Estados Unidos.



**Fig. 35.** Foto de Lejaren Hiller con el ordenador ILLIAC II en la University of Illinois, 1956 (Bewley, 2004, p. 6).

Según los mismos Hiller e Isaacson en un documento que registraba las ideas de la *Illiac Suite* conservado por la Universidad de Illinois, la primera idea que originó la composición de esa obra derivaba de constatar cómo un ordenador de alta velocidad como el *Illiac* podría ser utilizado para generar material musical a través de instrucciones generales derivadas de reglas composicionales conocidas.

Para ello, Hiller y Isaacson diseñaron 16 reglas para la selección de alturas, donde 7 de esas reglas eran para la producción de melodías: limitación del rango melódico (dentro de una octava), elección de las notas iniciales y finales, intervalos prohibidos para determinados saltos, movimientos limitados después de un salto, restricciones para notas repetidas y reglas que evitaban la repetición de notas agudas.

Cinco reglas para los intervalos verticales, como los límites para la primera, la penúltima y la última verticalidad y cuatro reglas para restringir los tipos de movimiento paralelo y movimiento de voces. Para el primer movimiento, 500 melodías monofónicas fueron creadas y para el segundo movimiento, el modelo de Fux fue expandido para

generar contrapunto a cuatro voces. En ambos movimientos, la altura fue el único parámetro musical generado y para el ritmo se pusieron duraciones iguales. El tiempo y la dinámica fueron añadidos sin ayuda algorítmica.

El tercer movimiento incorpora teoría musical del siglo XX diseñada para producir música cromática con límites donde los parámetros generados algorítmicamente fueron las alturas, el ritmo, la dinámica y la articulación. Las notas se escogen al azar y se filtran a través de reglas que especifican el tamaño de los saltos, los límites de los registros, la resolución del tritono y manejo especial del intervalo de octava. Incorporaba, sin embargo, técnicas serialistas, generando series de 12 notas a partir de notas igualmente escogidas al azar. Esas series eran variadas con las operaciones seriales de inversión, retrógrado y retrógrado invertido. Utilizaban patrones rítmicos predeterminados, las dinámicas tenían dos atributos; un valor estático entre pp y ff y un valor dinámico entre disminuyendo o crescendo y las indicaciones de articulación eran seleccionadas de una lista de 16 posibilidades.

El cuarto movimiento se desarrolló en el intento de descubrir un estilo de composición más apropiado para un ordenador. Utilizaron para ello cadenas de Markov para seleccionar los intervalos y la armonía así como también utilizaron modelos de teoría musical como una estructura jerárquica basada en los métodos de análisis de Schenker. Sin embargo, las indicaciones de tempo, compás y dinámica se añadieron sin ayuda algorítmica. Es el único movimiento no producido a partir de una combinación de resultados separados.

La *Illiac Suite*, como anteriormente afirmamos, está considerada como la primera obra compuesta con la utilización o asistencia de un ordenador. En este caso, además, destaca el intento de utilizar un ordenador como el *Illiac* para ello. Con un enfoque diferente, encontramos justo posteriormente a Iannis Xenakis, que se encontró con la dificultad en realizar los cálculos para sus composiciones y necesitó una herramienta más rápida y fiable. Ese enorme trabajo que realizaba entonces a mano, le llevó a buscar asistencia en los ordenadores. Al escuchar sobre el trabajo de Hiller con la *Illiac Suite*, Xenakis le escribió esta carta, en el año 1962, en la cual pregunta por su libro *Experimental Music* y artículos sobre la *Illiac Suite*:

10-4-62

My dear friend,

Thanks a lot for your letter and the two tapes.

Could you send me articles on electronic music and computers? I would like very much also to read your book on the I Ching suite I think which has belongs to Moles. But he is very secret, and in any way I would like to have it myself.

IBM will present <sup>in 1963</sup> (to) would present a piece of "Free Stochastic composition" for 10 players entitled ST 10-1, 080262.

I have not yet written a paper on this but only a small explanation which will be published in the IBM review. I'll send it to you when it comes out.

Do you receive the Gr. Blätter? If not, just a note and I'll send you the latter. No 23/24 containing the last summer's encounter at Graverano.

Best wishes to you and your wife

Yours

Xenakis

Fig. 36. Carta de Iannis Xenakis a Lejaren Hiller en 1962 (Bewley, 2004, p. 13).



En esa carta, podemos constatar que comenta su trabajo en la obra *ST 10-1, 080262* así como que su trabajo será publicado por IBM. Esa misma obra coincide con el capítulo V *Free stochastic music by computer* de su libro: *Formalized Music* (Xenakis, 1992, pp. 131-154).

En la introducción a ese capítulo, describe cómo la teoría desarrollada en *Achorripsis* tuvo que esperar cuatro años para poder ser ejecutada mecánicamente. Eso y según el mismo Xenakis, solamente fue posible con el trabajo conjunto de François Génueys de IBM-France, que le ayudó con la programación del ordenador IBM-7090.

En ese mismo capítulo, Xenakis analiza la composición de la obra *ST 10-1, 080262* como descrita en la carta y, lo más interesante, en la figura V-3, el código en lenguaje Fortran IV para realizar los cálculos que describe en el análisis de esa misma obra.

Otra aproximación a la composición algorítmica con la utilización de ordenadores fue la del compositor alemán Gottfried Michael Koenig (1926-). Conectado con el serialismo, Koenig buscó una solución para generar material composicional a través de la utilización de procesos aleatorios o con el uso de algoritmos donde, al insertar datos en concreto, el ordenador responde con una serie de posibilidades que serán interpretadas y utilizadas bajo las preferencias y decisiones del compositor. Ese material generado se convierte así en una especie de «sugerencia» donde el compositor lo interpreta a su manera. Para ello, Koenig creó un *software* en el año 1964 llamado Project 1 (PR1) con la intención de utilizar las reglas composicionales del serialismo. Según el mismo Koenig en su artículo *Protocol: a Report on the 1974/75 Class in Programmed Music at the Institute of Sonology* (Koenig, 1984), Project 1 es un programa experimental que anhela conseguir resultados al azar para parámetros previamente elegidos. En este caso, el azar reemplaza las permutaciones referentes a las reglas seriales a las cuales el compositor está acostumbrado a manipular, por otras permutaciones menos predecibles. Sin embargo, Project 1 considera que por impredecible que pueda ser la utilización del azar, ese debe de estar controlado por la introducción correcta de datos, así como por la debida interpretación de las listas generadas, para que se pueda conseguir material composicional en medianas o largas escalas.

El acercamiento del Project 1 a la generación de material composicional debe de estar conectada a una composición preconcebida a la utilización del programa y a la evaluación de las tablas de resultados generadas por ese. El resultado debería estar relacionado posteriormente a la distribución de ese entre instrumentos, así como con su viabilidad y sonoridad para la creación de un objeto estético.

Como objetos internos del programa, la generación de material es debida a algoritmos en los cuales el compositor no puede influenciar o modificar. La tarea de estos algoritmos es generar material composicional aleatorio e independiente de la forma, visto que Project 1 no tiene ningún control sobre la misma, siendo la composición final del fraseo debido a la consecuente interpretación del compositor. Pero, técnicamente, la forma se resumiría en la superposición de frases de diferentes duraciones generadas por el programa, ocurriendo un respiro natural cuando sus duraciones coinciden.

Los factores externos del programa son las intervenciones por parte del compositor, que determinan las listas de material introducidas. Esas listas controlan factores como los instrumentos, los tiempos, retrasos, números de registros y valores de dinámica.

Los instrumentos están definidos por su nombre solamente, sin distinguir otras propiedades del mismo. La unidad de tiempo está definida por fracciones ( $1/2$ ,  $1/4$ , etc.) y los retrasos se refieren al tiempo que separa la entrada de una frase de la siguiente. La armonía está basada en grupos de tres notas, unidas en una estructura de 12 notas. La variable de registro permite la creación de diferentes franjas; como alguna octava particular o instrumentos con un rango de tesitura específico.

La variable de dinámicas está definida por valores tradicionales de las mismas. Por defecto, el programa permite 28 entradas con retrasos diferentes, nueve instrumentos, cuatro registros y ocho grados de dinámica.

Analizado de forma sencilla, Project I compone una secuencia de acordes o frases, donde el tamaño del mismo depende de la variable de retraso introducida por el compositor. Depende del compositor dividir esos acordes en voces y otorgarles ritmo. Aunque este tiene mucha libertad para introducir los parámetros deseados, que ejercen gran influencia en el resultado, el compositor sigue atado considerablemente a su constitución, es decir, a estos únicos parámetros preestablecidos.

En el año 1966, Koenig desarrolla un nuevo *software* llamado Project 2 (PR2), que difiere de su antecesor en su principio polifónico.

Project 2, a diferencia del Project 1, permite al usuario introducir ocho parámetros iniciales: instrumento, armonía, registro, retraso de entrada, duración, pausas, dinámicas y modo de actuación. Trabaja con hasta seis algoritmos diferentes y al poseer el parámetro de pausas y de retraso de entrada, permite la producción de ritmos. En términos generales, Project 2 es un sistema más abierto y configurable que su antecesor Project 1.

Tanto Project 1 como Project 2 están dotados de un sistema de sonido que puede ser controlado en cuanto a ritmo, dinámicas y armonías del material generado. El espectro del sonido puede ser almacenado y luego asignado en diferentes canales por cuestiones timbrísticas de diferenciación de instrumentos.

Project 1 fue originalmente escrito en Fortran II para ser utilizado en el IBM 7900 y posteriormente transcrito al Algol 60 y, por último, al Fortran IV, para ser utilizado en el ordenador PDP-15.

Project 2 fue originalmente escrito en Algol 60 y posteriormente transcrito al Fortran IV. Ambos Project 1 y Project 2 fueron adaptados posteriormente al Visual Basic de *Microsoft Windows* que son conservados y todavía utilizados por el mismo Koenig.



**Fig. 37.** Foto del PDP-15, ordenador que utilizaba Koenig para ejecutar el Project II.<sup>7</sup>

Koenig creó igualmente un tercer programa llamado SSP (Sound Synthesis Program) que está conectado con la generación de sonidos electrónicos y, por lo tanto, lo trataremos juntamente a otros programas de esta misma raíz en el siguiente apartado (2) junto a la síntesis no estándar.

---

<sup>7</sup> Fuente: <http://koenigproject.nl/project-1/>. Visitado: 02/02/2020

## 1.6. Teoría del caos y fractales

El término «caos» proviene del idioma griego y quiere decir originalmente «espacio» o «abismo». Hoy en día, esa palabra es utilizada coloquialmente en el sentido de «desorden», un significado que le fue otorgado a mediados del siglo XVII. En las matemáticas o física, el término «caótico» se aplica a estados particulares de un sistema concreto que sea difícil de predecir.

El término «caos» fue introducido en el entorno de las matemáticas por primera vez en 1975 a través de un artículo publicado por los matemáticos Tien-Yen Li y James York.

Sin embargo, Jules Henri Poincaré ya había observado en su libro *Science et méthode*, que discute sobre mecánicas celestiales, el hecho de que pequeñas modificaciones en el estado inicial de un sistema podrían tener consecuencias impredecibles.

Los fractales son formas geométricas que demuestran un alto grado de autosimilitud, lo que significa que patrones gráficos específicos recurren de manera idéntica o muy similar en diferentes grados y magnitudes. Las estructuras fractales pueden ser encontradas en procesos de cristalización, en los trazados de la costa de un determinado país, o en el crecimiento de plantas.

La teoría del caos se tornó extremadamente popular en los años 80 debido a una gran variedad de opciones que generaban los trabajos de Edward N. Lorenz y Benoit Mandelbrot, así como las fascinantes ilustraciones gráficas que generaban esos algoritmos, y dieron pie a una discusión fuera del ámbito matemático.

Como conclusión, la teoría del caos y los fractales se postuló como un modelo de explicación universal para fenómenos naturales complejos. Detallaremos enseguida, por lo tanto, sus principales algoritmos y sus utilidades iniciales e incluiremos en relación a los fractales, el sistema de Lindenmayer que no utiliza ningún tipo de ecuación e inicialmente fue pensado para representar el crecimiento de ciertas plantas, pero tiene igualmente una larga relación posterior con la composición algorítmica.

### 1.6.1. Métodos más relevantes en esta investigación y ejemplos personales de su utilización

En este apartado exponemos la teoría básica de algunos métodos de la composición algorítmica más utilizados a lo largo del tiempo, así como algunos ejemplos para establecer la teoría que será utilizada para analizar obras de algunos compositores y

comprender los métodos algorítmicos para generar sonidos que serán objetivo de esta tesis y experimentación sobre la misma expuesta en el apartado 2.

### 1.6.1.1. Conjunto de Mandelbrot

El conjunto de Mandelbrot es probablemente el más popular de todos los fractales, así como el objetivo más popular de todos los matemáticos. Muchos opinan que no solamente es el objeto más bonito, sino también igualmente el más complejo desde que se dio a conocer mediante los experimentos de Mandelbrot en 1979 y ha sido replicado por miles de científicos y aficionados por todo el mundo, a los cuales les fascina todas las posibilidades que se pueden producir en una pantalla de ordenador.

Benoit Mandelbrot nació en 1924 en Polonia y después de que su familia emigrase a Francia en 1937, su tío se ocupó de su educación. Fue su tío quien en esa época le dejó los papeles que contenían las ideas del matemático Gastón Julia, que le sirvió, muchos años después y ya en 1977 para basar su logro con el algoritmo que le hizo famoso. Las ideas de Julia están íntimamente conectadas con el algoritmo de Mandelbrot, así como su utilización en el área de los fractales (Peitgen, Jürgens and Saupe, 2004, pp. 783 - 784).

El algoritmo se define por:

$$z_{n+1} = z_n^2 + c$$

Donde:

- «*z*» es la respuesta al algoritmo.
- «*n*» es el número actual de iteraciones (0,1,2,3,4...).
- «*c*» es el valor inicial de iteración.

La ecuación tiene características individuales muy concretas, como, por ejemplo, *c* tiene que ser un número entre 1 y -2. Para esos valores, la respuesta *z* del algoritmo puede ser periódica o caótica. Para cualquier número que sobresalga esos valores, la respuesta del algoritmo tendería al infinito rápidamente.

Como ejemplo de periodicidad, si introducimos de inicio el valor *c* = -1, la respuesta de *z* sería:

$$n1 = 0$$

$$n2 = -1$$

$$n3 = 0$$

$$n4 = -1$$

o sea, una periodicidad infinita entre 0 y -1.

Sin embargo, si iniciamos las iteraciones con  $c = -1,57$  los valores de  $z$  serían:

[0, -1.57, 0.89, -0.77, -0.98, -0.61, -1.19, -0.14...]

o sea, caótico.

Como ejemplo de un número que sobresalga los límites anteriormente definidos, si empezamos  $c = 1,5$ . Exponemos número de interacción y su resultado numérico:

$$n1 = 0$$

$$n2 = 1,5$$

$$n3 = 3,75$$

$$n4 = 15,56$$

$$n5 = 243,69$$

$$n6 = 59387$$

$$n7 = 3526815946,3$$

$$n8 = 1,243843071906e+19$$

$$n9 = 1,5471455875285e+38$$

$$n10 = 2,3936594690089e+76$$

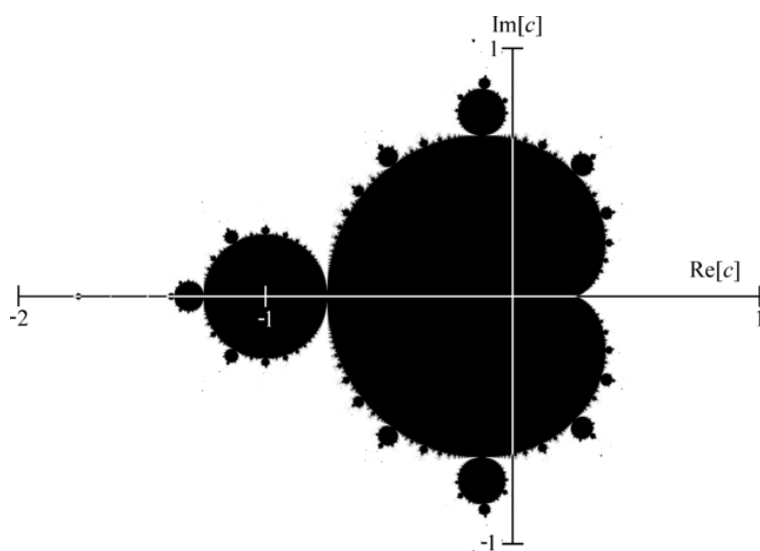
$$n11 = 5,7296056535759e+152$$

$$n12 = 3,2828380945489e+305$$

$$n13 = \text{inf}$$

Vemos como a partir de la iteración  $n8$  el ordenador nos devuelve un número complejo y a partir de la iteración 13, como infinito.

El gráfico que produjo Mandelbrot en el 1979 y que hizo que ese algoritmo se hiciera tan famoso fue el siguiente:



**Fig. 38.** Gráfico generado por la ecuación de Mandelbrot (Peitgen, Jürgens and Saupe, 2004, p. 786).

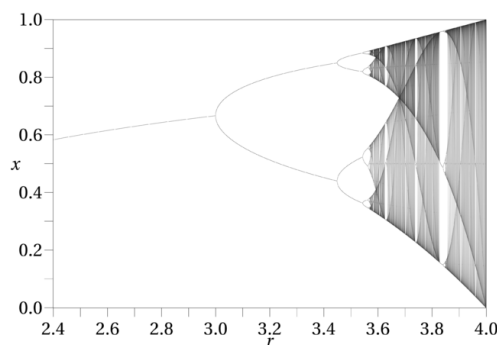
Este gráfico se construye utilizando puntos negros para los valores que son periódicos o caóticos y blancos para los que tienden al infinito. Podemos observar que el objeto que se forma se contiene dentro del plano horizontal comprendido entre los valores 1 y -2 y su autosimilitud, que se expande entre los planos positivo y negativo y de manera horizontal.

Ese gráfico dio origen a tanto interés por la ecuación, sin embargo, la ecuación encontró diversos objetivos de utilización, como las dinámicas complejas, por ejemplo.

La utilización de esta ecuación en la música estará ejemplificada en obras que serán descritas en los capítulos del apartado 1.7 y en el apartado de experimentación (2.2.1.), donde tendrá un gran protagonismo en la generación de sonidos y elementos musicales a través de la utilización de la electrónica.

#### 1.6.1.2. Mapa Gaussiano

El mapa gaussiano ha sido menos explotado en los últimos años vista su semejanza al mapa logístico que fue desarrollado por Pierre-François Verhulst en 1837. Esa ecuación fue inicialmente desarrollada para el desarrollo temporal de una población específica bajo la influencia de diversos factores determinantes. Ese mapa se hizo mundialmente conocido a través de este gráfico:



**Fig. 39.** Gráfico generado por la ecuación del mapa logístico (Patidar, 2006, p. 36).

La ecuación que lo desarrolla es:

$$x_{n+1} = r x_n (1 - x_n)$$

Sin embargo, el mapa gaussiano fue utilizado en otros rangos de las ciencias naturales como la física, química, biología e incluso ingeniería, debido a una característica única que la diferencia del mapa logístico: dependiendo de sus valores iniciales, el mapa gaussiano puede desarrollarse de manera caótica, pero también en forma de atractor. La definición exacta de los atractores la expondremos en el siguiente apartado.

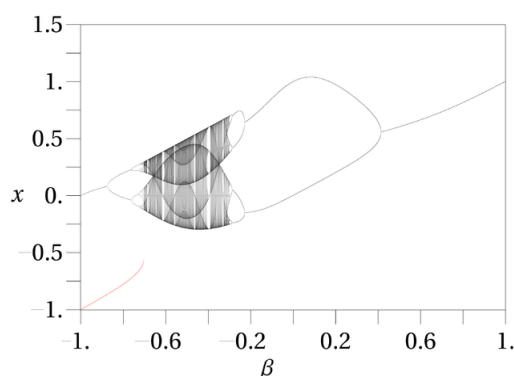
Esa doble posibilidad que nos ofrece este algoritmo es lo que le da igualmente interés musical, vista la periodicidad y comportamiento caótico que se puede sacar de la ecuación, que nos será útil tanto en la composición acústica como en la experimentación sonora.

El mapa gaussiano recibe ese nombre por su correlación matemática con la distribución Gaussiana arriba descrita, y su ecuación se define así:

$$x_{n+1} = e^{-bx_n^2} + c$$

El mapa que se construye es el presentado abajo, donde podemos notar las diferencias básicas de respuesta de la ecuación si la comparamos con el mapa logístico arriba expuesto (figura 39):





**Fig. 40.** Mapa generado por la ecuación del Mapa Gaussiano (Patidar, 2006, p. 36).

Una de las características de la ecuación del mapa gaussiano es la tendencia de patrones cortos en sus cadenas, así como cadenas pequeñas que tienden a un único número muy rápidamente. Al averiguar esas características, mi primera reacción al componer con este algoritmo fue trabajar con patrones musicales. Para exponer ese tipo de utilización del algoritmo, aportó un ejemplo de mi *Gauss Sonata* para violín y piano<sup>8</sup>:

Todo el primer movimiento de la sonata está trabajado en un contrapunto de patrones rítmicos que repiten la misma nota, formando algo como una textura, ya que esos patrones rítmicos (cuatro en el total) son creados con la utilización de la ecuación y tienen, cada uno de ellos, duraciones diferentes.

Para crearlos, aplicamos una regla de proporciones, asignamos al ritmo de negra (un tiempo en compás 4/4) el valor 1. Si la respuesta de la ecuación fuese 0,5, entonces el ritmo generado sería una corchea, o sea, la mitad del valor de la nota inicial. Aplicando a la ecuación los valores iniciales  $a = -12,4$  y  $b = -0,2$ , sabiendo que  $e$  es el número de Euler = (2,71828...), los resultados serían:

0, 0.8, -0.2, 0.41, -0.08

Multiplicamos esos valores por dos, para tener resultados más adecuados a nuestra regla de proporciones y a la vez, los transformamos todos en valores absolutos (positivos). Una aproximación es naturalmente necesaria (entre paréntesis):

1.6 (1.5), 0.4 (0.5), 0.82 (1.0), 0.16 (0.25)

<sup>8</sup> La partitura completa de la Gauss Sonata está adjunta en el apéndice I digital (5.1. - CD) y en el apartado III - 5.3. obras contiene los movimientos analizados en este apartado.

Transformando esos valores en ritmos, el resultado sería: negra con puntillo, corchea, negra y semicorchea. Podemos comprobar el patrón en notación musical, que sería el más agudo (C5)::



**Fig. 41.** Particella del piano de la Gauss Sonata de Luis Fonseca: compás 1 al 3.

Podemos observar que el patrón se repite y hace un complejo contrapunto con los otros tres patrones más abajo, que han sido generados de la misma manera, pero con valores iniciales distintos de la ecuación. La sucesión de acordes también ha sido generada por el mismo algoritmo.

### 1.6.2. Atractores y atractores extraños

La definición de atractor dentro de los algoritmos es conocida por evolucionar numéricamente solamente con determinados valores, dada una gran variedad de condiciones y posibilidades iniciales. Para que se comprenda la definición, la respuesta de la ecuación sería siempre la misma o tendería al infinito o no saldría de 0 con una gran cantidad de valores iniciales. Sin embargo, con los valores correctos, un atractor puede ser un patrón geométrico y, como objeto dinámico, puede ser caótico. Si se deriva a una estructura fractal más compleja, sería definido como un atractor extraño. Están, por lo tanto, íntimamente conectados con la teoría del caos, pero se considera matemáticamente que los atractores están todavía al principio de su comprensión y utilización, pero que aportan un gran desafío para el futuro de esta ciencia (Peitgen, Jürgens and Saupe, 2004, pp. 605 - 608).

En este apartado, definiremos los atractores más importantes dentro de esta investigación.

### 1.6.2.1. Atractor de Lorenz

Cuando en 1962 Edward Lorenz publicó su trabajo en el *Journal of the Atmospheric Sciences* definiendo por primera vez lo que era un atractor extraño, buscaba un sistema dinámico con el cual demostrar o aplicar en el estudio de previsión meteorológica. Han sido necesarios diez años para que los científicos se dieran cuenta de la enorme hazaña de Lorenz al desarrollar y definir tal sistema y su posible utilidad no solo en meteorología, pero en varios campos, desde las matemáticas pasando por varias de las ciencias naturales.

Obviamente, lo que descubrió Lorenz no se puede aplicar directamente en las ciencias físicas en cuanto a movimientos de masas de aire, pero sí tienen fundamento en ellas si relacionamos el movimiento del aire cuando se calienta cerca de la tierra y sube a la atmósfera, bajando de nuevo cuando se enfría.

El sistema dinámico (sistema que se desarrolla en función del tiempo) que desarrolló Lorenz contiene tres ecuaciones que se interrelacionan, siendo que cada cual representa un plano diferente y como resultado tenemos un gráfico fractal en tres dimensiones. Lo que es interesante en este sistema dinámico, es que se desarrolla con dos atractores diferentes, donde cada vez que una respuesta numérica se acerca a unos límites establecidos es inmediatamente atraída hacia el otro centro o órbita contraria, formando una especie de «mariposa» como dibujo final. Visto a lo que comentamos en la definición, que los atractores son sistemas que evolucionan en relación a ciertos valores iniciales, Lorenz definió igualmente por primera vez la expresión *efecto mariposa* observando la diferencia que pequeñas modificaciones en los valores iniciales causaban en el gráfico final de su sistema. Esa expresión fue extrapolada posteriormente para ejemplificar la idea de cómo el simple movimiento de las alas de una mariposa en un extremo del planeta podría causar un tornado al otro lado del mismo.

La ecuación se define por:

$$x' = -\sigma x + \sigma y \qquad y' = Rx - y - xz \qquad z' = -Bz + xy$$

Dónde son constantes establecidas por Lorenz:

$$\sigma = 10$$

$$B = \frac{8}{3}$$

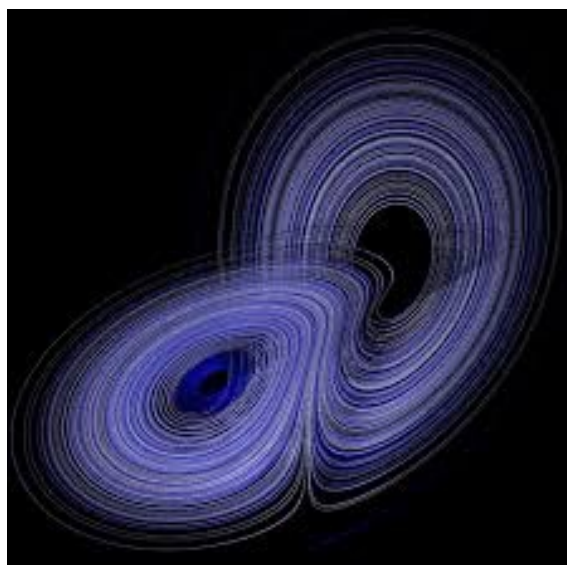
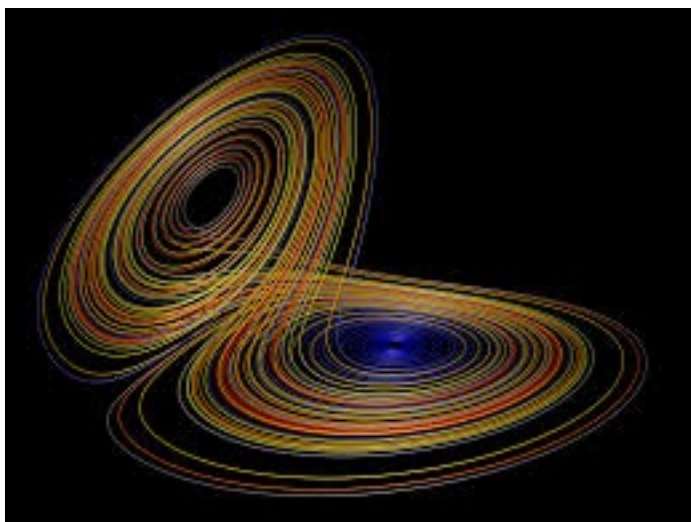
$$R = 28$$

$x$ ,  $y$ ,  $z$  son las variables iniciales (Peitgen, Jürgens and Saupe, 2004, p. 647).



**Fig. 42.** Gráfico tradicional resultante de las iteraciones del sistema de Lorenz.<sup>9</sup>

Con el paso del tiempo, otros valores iniciales fueron descubiertos, consiguiendo otros resultados semejantes, pero sin perder las características básicas del atractor:



**Figs. 43 y 44.** Gráficos resultantes de diferentes iteraciones del sistema de Lorenz.<sup>10</sup>

Sin ejemplificar momentáneamente con las posibilidades musicales de este algoritmo, demostraremos su utilidad dentro de esta investigación en el apartado 2.3.2. y en relación a la experimentación musical deseada.

<sup>9</sup> Teoría Del Caos. Wikiwand, [www.wikiwand.com/es/Teor%C3%ADa\\_del\\_caos](http://www.wikiwand.com/es/Teor%C3%ADa_del_caos). Visitado: 11/01/2020.

<sup>10</sup> El atractor de Lorenz in 3D, [www.paulbourke.net/fractals/lorenz/](http://www.paulbourke.net/fractals/lorenz/). Visitado: 11/01/2020.

### 1.6.2.2. Atractor de Henon

El atractor de Henon es un sistema dinámico en dos dimensiones que fue desarrollado por el astrónomo francés Michel Henon en 1976 como una simplificación del atractor de Lorenz. Debido a su simplicidad y a la estética de la curva que el algoritmo produce, hay miles de estudios que profundizan en su desarrollo y se ha transformado en uno de los iconos del caos así como Mandelbrot y Lorenz.

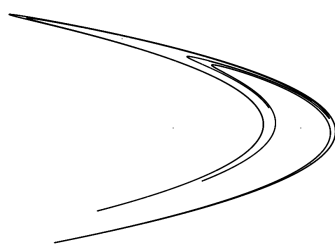
La ecuación se define por:

$$y_{n+1} = Bx_n$$

$$x_{n+1} = y_n + 1 - Ax_n^2$$

Dónde A y B son los valores arbitrarios iniciales de los cuales dependen el desarrollo del sistema.

El gráfico que atrae la atención hacia este sistema dinámico, resultante de los valores iniciales A = 1,4 y B = 0,3 es el siguiente (Peitgen, Jürgens, Saupe, 2004, pp. 609): <sup>31</sup>



**Fig. 45.** Gráfico tradicional generado por el atractor de Henon (Peitgen, Jürgens, and Saupe, 2004, p. 611).

Como ejemplo musical, exponemos la utilización de la ecuación para generar acentuación en un grupo de 12 semicorcheas que repiten la misma nota, utilizado en la *Henon Sonata* para Violonchelo y Piano<sup>11</sup>, tercer movimiento:

Se consideramos una semicorchea como el 25% de un tiempo (beat), o sea 0,25, la segunda semicorchea del segundo tiempo, tendrás el valor 1,5 por ejemplo.

<sup>11</sup> La partitura completa de la Henon Sonata está adjunta en el apéndice I digital (5.1. - CD) y en el apartado III - 5.3. obras contiene los movimientos mencionados en este apartado.

Utilizando la ecuación de Henon, tenemos para valores iniciales  $x = -0,67$ ,  $y = 0,5$ ,  $a = 0,5$  and  $b = 0,97$  los siguientes resultados para  $x$ , dónde el valor dentro de los paréntesis es una aproximación a valores utilizables en este caso:

0,5, 0,81(0,75), 1,39(1,25), 1,56(1,5), 2,06(2,0), 2,05(repetición del valor no utilizada), 2,54(2,5)

Utilizando esos valores para acentuar las semicorcheas, el resultado sería:



**Fig. 46.** Acentos generados por la ecuación de Henon, aplicados a una cadena de 12 semicorcheas escritas en la parte de piano de la Sonata Henon de Luís Fonseca, tercer movimiento, segundo compás.

Esos acentos terminan generando un ritmo si aplicamos pausas a las notas no acentuadas, como se puede apreciar en la figura abajo:



**Fig. 47.** Ritmo generado por la sustitución por pausas de las notas no acentuadas en la cadena de 12 semicorcheas presentada en la fig. 46 (compás 9 y 10 del tercer movimiento).

El proceso contrario crearía una célula rítmica que sería el «negativo» de la anterior descrita:



**Fig. 48.** Ritmo generado por la sustitución por pausas de las notas acentuadas en la cadena de 12 semicorcheas presentada en la fig. 46 (compás 14 del tercer movimiento).

Esas dos células rítmicas serán utilizadas y desarrolladas a lo largo del movimiento de esa sonata de diversas maneras y combinaciones.

### 1.7. Métodos desarrollados individualmente: ejemplos en obras

En este apartado expongo la utilización desarrollada por mi parte de algunas de las herramientas posibles desde los métodos descritos anteriormente, así como la utilización de alguno de los algoritmos igualmente expuestos y el análisis de otras estructuras igualmente desarrolladas por mí y conectadas con la composición algorítmica en el ámbito acústico.

La primera obra que analizamos será la *Mandelbrot Sonata* (2015) para contrabajo y piano, obra que recibió una Mención de Honor en el *Concurso Internacional de Composición David Walter 2016* organizado por el ISB (*International Society of Bassists*) en Estados Unidos. La obra, como sugiere el nombre, utiliza el algoritmo de Mandelbrot para generar diversos elementos musicales en diversos niveles.

Para ello, los resultados de las cadenas de respuesta del algoritmo son utilizadas con escalas de proporción para ajustarlo a la creación del elemento musical deseado. Este método une dos de las aproximaciones a la composición algorítmica asistida por ordenador, visto que este es utilizado tanto para la sugerencia de material que será utilizado e interpretado por el compositor de la manera que bien pretenda y a la vez, para calcular de manera rápida y precisa las respuestas de la ecuación utilizada.

Como antes mencionado, el algoritmo es utilizado para generar elementos musicales diversos, modulando así un elemento inicial de las siguientes maneras:

#### 1. Generando melodías:

Si consideramos que el número 0 es nuestra nota inicial y que el número 1 representa una octava arriba de esa nota inicial, entonces el -1 sería una octava abajo y un semitono sería  $1/12$ , o sea, 0,83333...

Ejemplo en la sonata: En el segundo movimiento, primer compás, el algoritmo es utilizado con  $c = -1,47$ . Los resultados serían (con aproximación de dos casillas decimales):

0, -1,47, 0,69, -0,99, -0,48, -1,24

Modulamos un C#4 como nota inicial (0), donde los resultados serían:

C#4, G#2, A4, C#3, G3, A#2



**Fig. 49.** Compás uno del segundo movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.

## 2. Generando acordes:

Utilizando la misma regla anterior y sumando tres o más notas consecutivas.

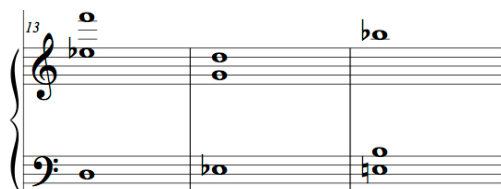
En el primer movimiento, una pequeña y periódica cadena de Mandelbrot con  $c = -1,38$  es utilizada para los cuatro primeros compases. Inmediatamente después, una cadena irregular con  $c = -1,8$  es utilizada, uniendo los resultados de 3 en 3:

-1,8, 1,44, 0,27, -1,73, 1,18, 0,42, -1,63, 0,84, -1,09, -0,62, -1,42 etc.

Modulando un C4 como nota inicial, obtenemos:

D2 - F5 - Eb4, Eb2 - D5 - G3, E2 - Bb4 - B2

El resultado se puede ver en los compases 13 a 15:



**Fig. 50.** Compases 13 a 15 del primer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.

## 3. Generando ritmos:

Utilizando la misma regla de proporciones, si consideramos que una negra es igual a 1, consecuentemente, tendríamos una corchea con un valor 0,5 y una blanca con valor 2. En este caso, todos los valores serán considerados absolutos.

En el primer movimiento, utilizando la misma cadena con  $c = -1,8$ :

-1,8, 1,44, 0,27, -1,73, 1,18, etc.



Modulando una negra como nota inicial, tenemos los resultados en los compases 25 y 26:



**Fig. 51.** Compases 25 y 26 del primer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.

#### 4. Modulando fórmulas de compás:

Con la misma regla de proporciones, considerando un compás de 2/4 como nuestro elemento inicial (1), consecuentemente, una respuesta de la ecuación de 0,5 lo modularía a un compás 2/8 y un 1,5 de respuesta, a un compás 3/4 por ejemplo.

En el tercer movimiento, la fórmula de compás es constantemente modulada, lo que resulta en la estructura del movimiento a través de la cadena de Mandelbrot con  $c = -1,5$ . Los resultados de esa cadena serían:

0,75, -0,94, -0,62, -1,11, -0,26, -1,43, 0,55, -1,19, etc.

El movimiento presenta como estructura la exposición de un compás determinado que será repetido constantemente dentro de compases que pasan por la modulación descrita anteriormente. Si el compás es menor que el original, el material será cortado, y si es mayor, habrá que añadir pausas. El principio del tercer movimiento es la presentación del ritmo de Carimbó (danza brasileña) con un rebote de arco que simboliza el gesto de tremolo en una guitarra. Esos dos compases son repetidos dos veces y luego con la modulación de fórmulas de compás:



**Fig. 52.** Compases 1 al 13 del tercer movimiento de la Sonata Mandelbrot.

La sonata también contiene elementos musicales generados por otras técnicas de composición algorítmica ajenas a la ecuación de Mandelbrot, aunque muchas veces, utilizando material que sí fue generado por esa ecuación:

### 5. Isorritmos:

Utilizados para desarrollar melodías o dobles cuerdas en el contrabajo en el primer movimiento. La primera intervención del contrabajo, por ejemplo, se genera con una tarea de siete elementos rítmicos y un color de seis notas que empieza en el compás nueve repitiendo así las mismas notas, pero cada vez con un ritmo diferente y dejando que el ciclo se cierre con la parte del piano:



**Fig. 53.** Compases 9 al 13 del primer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.

### 6. Patrones:

La parte del piano en el segundo movimiento está generada por la superposición de patrones de diferentes duraciones. El primer patrón tiene una duración de siete negras, el segundo de cinco negras y el tercero de tres negras. Superponiendo los tres a la vez y repitiéndolos constantemente y sabiendo que al ser su duración números primos entre sí, no volverá a coincidir su principio simultáneo antes de muchos compases ( $7 \times 5 \times 3$ ), generando así y a pesar de la constante y perceptible repetición, un compás único y diferente después del otro.

### 7. Ritmos complejos:

En el tercer movimiento, la célula rítmica del Carimbó es presentada por el contrabajo en el primer movimiento y como se ha comentado anteriormente, todo el movimiento será construido a través de este ritmo, sus variaciones y derivados, así como la modulación de fórmulas de compás. Para ello, cuatro micro melodías serán generadas (compases 15, 23, 35-37 7 41-43) uniando dos compases del ritmo de Carimbó con dos pausas extras de corchea, obteniendo así un compás de 5/4. Todas las unidades rítmicas que forman ese compás de 5/4 descrito, serán mezcladas para generar ritmos complejos.

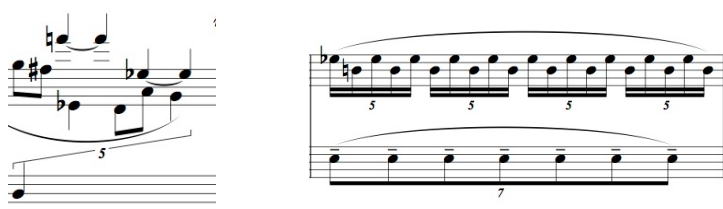
Las alturas serán generadas por la técnica de melodías antes descrita, consiguiendo así las cuatro micromelodías referidas:



**Fig. 54.** Compás 15 del tercer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca (micro-melodía).

## 8. Interferencias rítmicas:

Utilizando el principio de interferencia descrito anteriormente en el método de Schillinger, esa técnica composicional fue utilizada en este caso como contrapunto entre dos polirritmos que interfieren entre si dadas sus subdivisiones que no coinciden en ningún momento, salvo el principio del compás. En el primer caso (compás 17 del primer movimiento), la melodía hecha con isorritmos será interferida por un quintillo de negras (5:4) y en el segundo caso (compás 33 del mismo movimiento) dos ritmos constantes se interfieren; quintillos de semicorcheas (5:1) contra septillos de corcheas (7:4), ambos en un compás de 4/4:



**Fig. 55.** Compases 17 y 33 del primer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca.

## 9. Texturas rítmicas

Constituidas por la superposición de los ritmos formados para las micromelodías, dos en el piano y dos en el contrabajo y repitiendo las notas de un acorde generado por valores de la ecuación de Mandelbrot:



**Fig. 56.** Compás 85 del tercer movimiento de la Sonata Mandelbrot de Luis Fonseca (superposición de elementos rítmicos).

Todos los cálculos necesarios para realizar esta obra fueron hechos a través del *software* SuperCollider, utilizado especialmente para síntesis electrónica, pero que, en este caso, es utilizado como soporte para cálculos. Para ello, un código es desarrollado a través de una rutina, donde el algoritmo de Mandelbrot es aplicado y se pueda conseguir de ello tantas iteraciones necesarias en una fracción de segundos y con precisión máxima. Posteriormente otro código es desarrollado para relacionar la proporción de 1/12 con un cuarto de tono, obteniendo así una respuesta inmediata de notas relacionadas con el resultado de la ecuación, con la proporción deseada. SuperCollider será mejor analizado en su funcionamiento y utilizado para lograr resultados electrónicos relacionados con los algoritmos estudiados en el siguiente apartado.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> La partitura completa de la Mandelbrot Sonata está adjunta en el apéndice I digital (5.1. - CD) y el apéndice III - 5.3. obras.

The screenshot shows the SuperCollider software interface. On the left, a window titled 'Algorithms.scd' contains a code editor with a routine for calculating the Mandelbrot set. The code is as follows:

```

1 // Mandelbrot
2
3 (
4
5
6 Routine{
7   var z = 0, c = -1.5, n = 0, xn;
8   40.do{
9
10
11     n.post; ". ".post; (z.round(0.01)).post;
12     " ".postln;
13
14     z = (z ** 2) + c;
15
16
17     n = n + 1;
18
19     0.01.wait;
20   }
21 }
22 }).play
23 )

```

On the right, a window titled 'Post window' displays the output of the routine, showing the first 40 iterations of the calculation. The output is as follows:

```

-> a Routine
0.0
1.-1.5
2.0.75
3.-0.94
4.-0.62
5.-1.11
6.-0.26
7.-1.43
8.0.55
9.-1.19
10.-0.08
11.-1.49
12.0.73
13.-0.96
14.-0.57
15.-1.17
16.-0.12
17.-1.48
18.0.7
19.-1
20.-0.49
21.-1.26
22.0.08
23.-1.49
24.0.73
25.-0.97
26.-0.57
27.-1.18
28.-0.12
29.-1.49
30.0.71
31.-1
32.-0.51
33.-1.24
34.0.04
35.-1.5
36.0.74
37.-0.95
38.-0.61
39.-1.13

```

At the bottom of the interface, there is a status bar with the following information: Interpreter: Active, Server: 0.00% 0.00% 0u 0s 0g 0d, 0.0dB.

**Fig. 57.** <sup>13</sup> El software SuperCollider.

El segundo ejemplo de la utilización personal de la composición algorítmica y de métodos desarrollados individualmente se hará a través del análisis de la obra *Hommage a Rothko* para coro a capella, obra galardonada con un primer premio en el 4.º Concurso Internacional de Composición Ennio Morricone 2017 en Florencia - Italia.

*Hommage a Rothko* es una obra basada en las pinturas, la vida y las palabras del famoso pintor abstracto Mark Rothko. Sus famosas pinturas en capas de color se utilizan para generar las notas de la pieza, transformando las frecuencias de color en frecuencias de nota. Este proceso se utiliza para «escuchar» la expresión abstracta del pintor en el sonido. Para ello, las frecuencias extremadamente altas de los colores fueron divididas por 2 aproximadamente 38 veces, para encontrar una octava más baja en el rango de frecuencias del sonido. Utilizamos la tabla cromática de colores abajo (Fig. 58), calculamos el centro de la frecuencia de los colores principales y la dividimos conforme antes mencionado. El resultado sería (utilizando aproximaciones):

<sup>13</sup> El software SuperCollider y el código para generar interacciones de la ecuación de Mandelbrot en la ventana de la izquierda. Los resultados de las primeras 45 iteraciones empezando con el valor  $c = -1,5$  se puede ver en la ventana de la derecha. Se puede comparar los resultados con los expuestos en el número 4 de este análisis que está relacionado con la Fig. 1.7.4.

Color	Wavelength	Frequency
Red	~ 625-740 nm	~ 480-405 THz
Orange	~ 590-625 nm	~ 510-480 THz
Yellow	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
Green	~ 520-565 nm	~ 580-530 THz
Cyan	~ 500-520 nm	~ 600-580 THz
Blue	~ 450-500 nm	~ 670-600 THz
Dark Blue	~ 430-450 nm	~ 700-670 THz
Purple	~ 380-430 nm	~ 790-700 THz

Rojo - G (Rufus)  
 Naranja - A (Aliquam)  
 Amarillo - Bb (Flavum)  
 Verde - B (Viride)  
 Azul claro - C# (Priscianus)  
 Azul - D (Caeruleus)  
 Azul oscuro - D# (Caerula)  
 Morado - E (Purpura)  
 Marron - Red + Green (G+B)  
 Negro - Cluster

**Fig. 58.** Tabla cromática de colores según sus frecuencias.

Los colores secundarios fueron creados por dos notas que corresponden a los colores primarios utilizados para conseguir dichos colores secundarios. El negro es representado por un clúster, o sea, una unión cromática de varios colores que resultarían en el color negro.

El texto, en la primera sección de la obra, se basa en el nombre de los colores que estamos escuchando de inmediato y, en las restantes secciones, en frases dichas por el mismo pintor. Para evitar problemas de derechos de autor, las frases originales se modifican ligeramente utilizando diferentes palabras y sentidos, para adaptarse a la idea de la obra. El latín fue elegido como lenguaje sagrado, inspirado en una frase del pintor: «Los cuadros deben ser milagrosos».

Las frases utilizadas en la obra son (entre comillas las originales, posteriormente su modificación para la obra y por último su traducción al latín en cursiva):

- «Hay más poder en decir poco que en contarlo todo», Contar poco contiene mucho, *Dimidium dici possit multum.*
- «Los cuadros deben ser milagrosos», Estos colores son milagrosos, *Quod colores sint miracula.*
- «Solo hay una cosa que temo en la vida, mi amigo: un día el negro se tragará el rojo», No temas más, el rojo se volvió negro, *Noli timeri, rubrum factus nigrum.*
- «El silencio es muy preciso», El silencio es perfecto cuando es absoluto, *Silentium est absolutus perfecta est.*

La obra está desarrollada en cinco secciones. Las cuatro secciones siguientes se basan en frases del pintor y estructuras composicionales diferentes, que corresponden a un periodo de la vida del pintor, y en orden cronológica. La primera sección se basa en pinturas del principio del periodo de sus obras con franjas de color (al rededor del año 1950). El nombre de los colores se presenta horizontalmente como en las pinturas y se crea un contrapunto caótico para presentar las palabras y crear tensión en la música. La segunda sección se basa en el texto *Decir poco contiene mucho*, donde el texto aparece roto en una primera instancia con las sílabas de la frase que coinciden con la secuencia de Fibonacci (1,2,3,5,8 ...) y se llena, poco a poco, con el resto de sílabas hasta que el texto pueda entenderse. La tercera sección se construye con un contrapunto caótico en isorritmos, donde las notas de los cuadros se usan horizontalmente. El texto se distribuye entre las voces, para formar un sentimiento «milagroso» según la frase correspondiente. La cuarta sección es un Kadish construido con las pinturas del último periodo de la vida de Rothko, que representan su premonición de suicidio: «El rojo se vuelve negro», sabiendo que sus últimos trabajos fueron las pinturas negras de la Capilla Rothko antes de que se quitara la vida. Su muerte está representada en la última sección, conectándola al *silencio absoluto* en una voz solista. El orden y las pinturas utilizadas en la obra son:

(Primera sección):

Green and Tangerine on Red  
1956



Untitled  
1947



Royal Red and blue  
1954



Blue yellow green on red  
1954



(Segunda sección):

Orange and yellow  
1956



Royal Red and blue  
1954



(Tercera sección):

Yellow Blue Orange  
1955



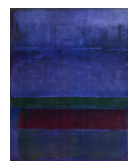
Red Blue Orange  
1955



Magenta, Black, Green on Orange  
1950



Blue Green and Brown  
1952



(Cuarta sección):

No. 14, 1960



No. 2 1961



No.1 1962



Untitled, 1963

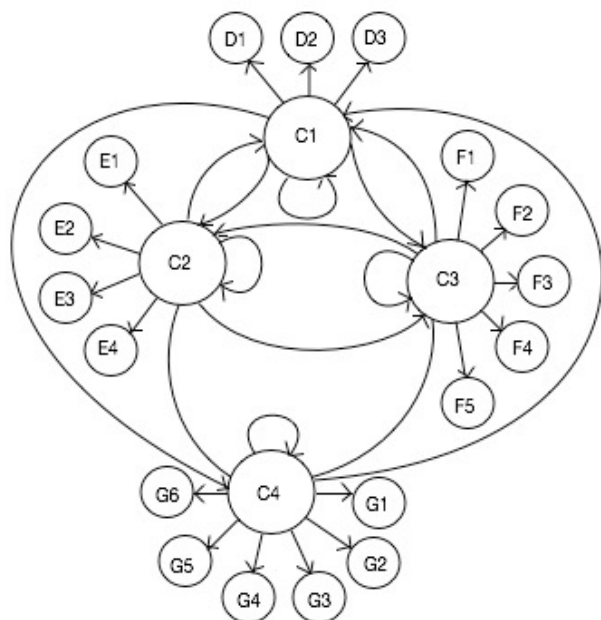


Rothko Chapel, 1964 - 1967



**Figs. 59.** Cuadros de Rothko utilizados en la obra *Hommage a Rothko* de Luis Fonseca. <sup>14</sup>

Para confeccionar los ritmos en la obra, un sistema de cadenas de Markov basado en probabilidades se construye para generar ritmos complejos que se utilizarán con el fin de construir un contrapunto caótico, así como algunas frases:



**Fig. 60.** Estructura de interconexión de la cadena de Markov creada para generar ritmos en la obra.

<sup>14</sup> Fuente: <http://www.markrothko.org/paintings/>. Visitado: 03/04/2019








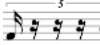
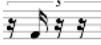
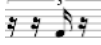
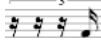
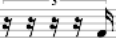
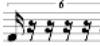
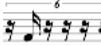
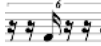
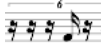
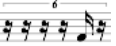
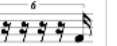


	C1	C2	C3	C4
C1	0,1	0,3	0,3	0,3
C2	0,3	0,1	0,3	0,3
C3	0,3	0,3	0,1	0,3
C4	0,3	0,3	0,3	0,1

**Tabla 8.** Probabilidades de la primera estancia de la cadena de Markov creada para generar ritmos.

C1		C2		C3		C4	
D1	0,33	E1	0,25	F1	0,2	G1	0,16
D2	0,33	E2	0,25	F2	0,2	G2	0,16
D3	0,33	E3	0,25	F3	0,2	G3	0,16
		E4	0,25	F4	0,2	G4	0,16
				F5	0,2	G5	0,16
						G6	0,16

**Tabla 9.** Probabilidades de la segunda estancia de la cadena de Markov creada para generar ritmos.

	D1	D2	D3			
C1						
	E1	E2	E3	E4		
C2						
	F1	F2	F3	F4	F5	
C3						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
C4						

**Tabla 10.** Tabla que relaciona el resultado final de la cadena de Markov anteriormente descrita con la subdivisión de la célula rítmica deseada.

Para que entendamos las tablas construidas para la cadena de Markov arriba descritas, hay que empezar por el resultado deseado, un contrapunto caótico donde el cambio de nota podría ser sobre las subdivisiones de cuatro células rítmicas diferentes: tresillo, semicorchea, quintillo y sextillo. Si observamos la estructura de esta cadena (figura 60), podemos ver los objetos con letras C (1, 2, 3, 4). Esos objetos se refieren a las estructuras rítmicas antes señaladas (tresillo, semicorchea, quintillo y sextillo). Esos son los objetos de primera estancia de la cadena; de cada objeto C, se puede observar que salen diferentes objetos D (1, 2, 3), F (1, 2, 3, 4), G (1, 2, 3, 4, 5) y F (1, 2, 3, 4, 5, 6). Esos objetos representan las subdivisiones rítmicas, o sea, D1 es primer tresillo del grupo, D2

el segundo y D3 el tercero. Con lo cual, C4 - G3 se refiere, por ejemplo, al tercer sextillo del grupo rítmico. La Tabla 8 es la tabla de probabilidades, que quiere decir que al salir un evento Cn, la probabilidad de que se repita es de 10 % y la de que se vaya a otro evento Cn es de 30 %. La Tabla 9 es la tabla de probabilidades de segunda estancia, o sea, elegido un evento Cn, la probabilidad de que salga una de sus subdivisiones es de 33 % en C1, 25 % en C2, 20 % en C3 y 16 % en C4, o sea, probabilidades iguales. La cadena está calculada igualmente en SuperCollider, donde el programa elige un evento inicial de manera aleatoria y luego respeta las probabilidades para seguir eligiendo los siguientes eventos.

Como resultado de la mezcla entre la cadena de Markov para generar ritmos y las alturas generadas por los cuadros anteriormente descritos y el nombre de los colores, presentamos la primera sección de la obra *Hommage a Rothko* para coro a capella:

Score

Hommage a Rothko

for Choir a Capella

Luis Fonseca  
(2017)

Lento  $\text{♩} = 72$

Soprano

Alto

Tenor

Baritone

*p* Vi-  
*mp* Cae-

A-  
li-  
quam

ru-  
la  
*mf* Ru-  
*mp* Fla-  
vum  
*mf* Cae-

Divisi  
Cae-  
Fla-  
Vi-

ru-  
pu-  
ru-  
ra  
le-  
us  
vum

ri-  
de  
fus

**Fig. 61.** *Hommage a Rothko for choir a capella de Luis Fonseca compases 1 - 11. La obra completa está adjunta al apéndice I digital (5.1. - CD) y apéndice III - 5.3. obras para una consulta más detallada. (Fonseca, Luis. Hommage a Rothko 2018. Madrid: Da\_sh editions - DS-0010. Edición).*

## 1.8. Conclusiones del apartado

Si revaluamos todo lo expuesto en este apartado, desde el primer método utilizado por D'Arezzo, hasta los días de hoy y todas las posibles aplicaciones de la composición algorítmica en diferentes elementos musicales con el objetivo de generar material musical a través de un método creado por el compositor, la conclusión más clara que podemos obtener es que la composición algorítmica es una metodología composicional que puede y fue utilizada de diversas maneras y en distintas épocas de la historia de la música, o sea, que no tiene época ni estilo. Constatamos, por lo tanto, que es una metodología adaptable a cualquier compositor que se interese por ella y, a la vez, a su estilo, sea el que fuere.

Llegado a este punto de la investigación, donde podemos constatar la flexibilidad de la composición algorítmica como metodología composicional, podemos hacer una transición, con esa conclusión en la mano, hacia el objetivo más concreto de esta: la composición algorítmica aplicada a la generación de timbres novedosos. Si podemos generar música para que sea ejecutada por instrumentos acústicos, vamos utilizar la electrónica para encontrar fórmulas para generar timbres, aplicando la composición algorítmica y los algoritmos más relevantes en esta investigación antes expuestos.

Antes de empezar con la experimentación directa de esta metodología, daremos paso a una investigación y definición de esta práctica utilizada anteriormente por ciertos compositores y *softwares* desarrollados por ellos mismos hasta llegar a los programas de ordenador hoy utilizados con más frecuencia. Se utilizarán esos mismos *softwares* para alcanzar el objetivo de síntesis de sonido y timbres novedosos de esta investigación.

## 2. Definición de «síntesis no-estándar»

Para que continuemos y nos enfoquemos en el objetivo central de esta tesis, es necesario definir y entender la «síntesis no-estándar». El origen de esta técnica viene de compositores del siglo XX como König, Brün y Xenakis. Esos compositores empezaron a utilizar el ordenador como fuente de síntesis de sonido y a través de ideas composicionales y organización musical del mismo; al contrario de los medios estándar hasta entonces utilizados, que se basan en métodos físicos, acústicos o psico-acústicos. La «síntesis no-estándar» por lo tanto, podría ser definida como la síntesis de microsonidos a través de ideas composicionales.

El desarrollo de la música electroacústica hasta la actualidad nos trajo a su elaboración a través de programas para ordenadores como SuperCollider o Max/MSP, de diferentes estructuras entre sí, pero con la misma finalidad: generar, manipular y controlar sonidos electrónicos. Esos dos programas son estándar en la producción musical electrónica en la actualidad y nuestra principal herramienta para lograr nuestros objetivos. Para ello, desarrollar en SuperCollider, generadores de señales de audio y de control, que puedan generar sonidos novedosos, creados con los algoritmos antes expuestos en esta investigación (Mandelbrot y Gauss), y conseguir, desde la «síntesis no-estándar» crear formas de ondas estructuradas por esas ecuaciones o utilizarlas para generar texturas sonoras, manipulando armónicos para conseguir aspectos tímbricos novedosos, al mismo tiempo que se generan ambientes sonoros a través de una reverberación con reflexiones calculadas con los resultados de esos algoritmos o se sitúa una fuente sonora en un espacio tridimensional con una panoramización algorítmica.

Antes que nada, vamos a retroceder y analizar lo que estos compositores antes citados desarrollaron, tanto en teoría relacionada a la síntesis no-estándar como los medios que encontraron y utilizaron para ello.

## **2.1. Teoría y softwares desarrollados cronológicamente para la síntesis del sonido**

Para entender mejor la síntesis no-estándar y poder adentrarnos en la investigación de los sonidos que podemos generar a través de algoritmos, vale la pena mencionar el trabajo de tres diferentes compositores, que, a su manera, fueron pioneros en esta práctica. Cada uno de ellos buscó, aunque con ayuda externa, desarrollar un tipo de *software* que pudiera dar paso a la estructuración del sonido y su posterior síntesis. Estos tres compositores y sus respectivos *softwares* serían: Gottfried Michael Koenig, compositor que hemos analizado antes por su Project 1 y 2 y que desarrolló el SSP para la síntesis de sonido; Herbert Brün por su lado con su SAWDUST e Iannis Xenakis con su GENDY.

### **2.1.1. El SSP de Gottfried Michael Koenig**

Koenig desarrolló su SSP (Sound System Program) en 1972, aunque desde 1960 ya había empezado a diseñarlo. El sistema está basado en la intención de transferir a la síntesis sonora los principios generativos que Koenig utilizaba para la composición de música instrumental. Su idea era encontrar un principio para generar estructuras

musicales, con ideas similares a las de Project 1 y 2, pero transportadas a la génesis del sonido. Para conseguir lo anterior, renunció a imitar los instrumentos acústicos y se centró en dos parámetros fundamentales del sonido: tiempo y amplitud. Genera de esa manera, cambios de amplitud dentro de un determinado espacio de tiempo al que nombra secciones. Esas secciones, así como cambios de amplitud, son seleccionados de una lista y unidos a un segmento sonoro. Esos segmentos sonoros pueden ser, a su vez, combinados en cualquier orden, logrando así una secuencia de sonidos que a su vez pueden ser percibidos como un único sonido o un simple movimiento sonoro perpetuo (Koenig, 1984, p.3).

El programa utiliza los principios de selección de Koenig, los mismos que él utilizó en sus composiciones instrumentales. Esos principios serían seriales y aleatorios, evitando así fundamentos musicales como repetición, expansión, dirección y reducción. En su programa Project 2, esos principios fueron utilizados para generar listas de parámetros y valores. En vez de especificar propiedades musicales como dinámicas, ritmo, duración o alturas con esos parámetros y valores; en el SSP, son utilizados para generar valores de presión y tiempo inmediatos, creando así una forma de onda (Döbereiner, 2011, p. 31).

Esas pequeñas formas de onda son organizadas en secuencias y así consecuentemente como antes fue expuesto.

### **2.1.2. El SAWDUST de Herbert Brün**

SAWDUST es un programa de ordenador (*software*) para componer formas de onda. Fue concebido por Herbert Brün, quien en 1972 hizo una propuesta a la Universidad de Illinois para llevar a cabo ese proyecto. SAWDUST fue implementado por primera vez en 1976 por Gary Grossman, quien la escribió en lenguaje de programación C y en un ordenador modelo PDP 11/50 del Laboratorio Digital de la misma Universidad. Brün describe su programa de la siguiente manera: «El programa de ordenador al que llamé Sawdust me permite trabajar con la parte más pequeña de las formas de onda y, de esa manera, unir las, mezclarlas o fundirlas con otras. Una vez compuestas, esas formas unidas y texturas son tratadas, por repetición, como periodos o por diferentes grados de cambio continuo, como momentos transitorios orientados en un proceso de transformación» (Brün, Chandra, 2001, p. 4).

El programa funciona con un lenguaje escrito, en el cual se deben definir tres dimensiones básicamente: los elementos, sus conexiones (*links*) que son secuencias de

elementos y una transformación entre esas conexiones. Posteriormente, al reproducir lo que se programó, SAWDUST crea una secuencia de formas de onda, unidas a través de una conexión, seguida de una variable, un silencio, otra conexión, un giro, etc. Esas conexiones o silencios, giros, son introducidos al programa por el usuario en forma de comandos directos, que definen cómo será el resultado o el desarrollo de esos elementos definidos. SAWDUST no permite que se mezclen secuencias producidas por el programa; para ello habría que utilizar otro tipo de *software* o secuenciador.

En diferencia al SSP de Koenig, el SAWDUST no está limitado a reglas composicionales preestablecidas y sí a ideas de composición de la forma de onda en sí, aunque el programa establece parámetros y reglas para ello que no son del todo flexibles.

**turn** transforms an initial link into a final one.

*Example:*

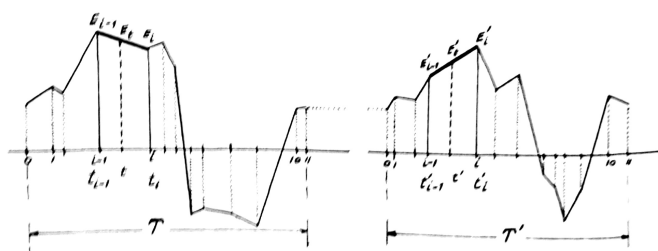
```
*      turn
name:          t2
first link name:  l1
  3 elem;   60 samples
position?      1
last link name:  l2
  4 elem;  100 samples
position?      1
rotate?        n
play last link? y
Amplitude range 1000 to 4000
use default values ?    y
Linkstates = 41, linksum 3280
turnsum?      44100
statements=    10
Wavy ? y
```

**Fig. 62.** Ejemplo de lista de programación con sus debidos comandos en el Sawdust de Herbert Brün (Brün and Chandra, 2001, p. 18).

### 2.1.3. La síntesis estocástica dinámica de Iannis Xenakis: los programas *Gendy* y *PARAG*

Iannis Xenakis define en su libro *Formalized Music* (Xenakis, 1992, pp. 289 - 293) su teoría de composición estocástica aplicada a la síntesis del sonido (apartado 1.4. Iannis Xenakis y la composición estocástica). La síntesis estocástica dinámica, desarrollada por Xenakis a mediados de la década de los setenta, tiene una aproximación a la síntesis no-estándar bastante cercana a la de Koenig, en cuanto a que planea la creación del sonido digital a través de la interpolación de valores de amplitud a lo largo del tiempo. Xenakis, sin embargo, y a diferencia de Koenig, no estipula ninguna regla composicional como condición para la creación de una onda sonora, sino que enfatiza sobre la formación del timbre a través de la periodicidad de esa misma onda. Xenakis

considera que cuanto más caótico sea el dibujo de esa onda en relación a su inconstante variación de amplitud en relación al tiempo, más se aproximará su timbre a un ruido; mientras que la repetición constante de la periodicidad de una onda simétrica, se acercaría cada vez más a una simple frecuencia determinada. Para ejemplificar esa teoría, Xenakis dibuja literalmente una onda, construyéndola con pequeños segmentos distribuidos a través de un tiempo determinado:



**Fig. 63.** Dibujos de ondas de sonido ejemplificados por Iannis Xenakis (Xenakis, 1992, pp. 289 - 293).

En el modelo representado en la Fig. 63, cada línea vertical representa un punto de rotura, que define la duración y amplitud de la onda construida y están interpolados linealmente. En cada repetición, como se puede ver en la Fig. 63 esos puntos son variados estocásticamente usando paseos aleatorios (random walks). Los pasos de estos paseos aleatorios pueden obtenerse utilizando cualquier tipo de distribución probabilística, como, por ejemplo, exponencial, Gaussiana, Poisson, Cauchy, etc. Existe el mismo número de duraciones y amplitudes como puntos de rotura en una onda (Xenakis, 1992, pp. 289 - 293).

En los años 80 y con un ordenador prestado por Hewlett Packard, Xenakis escribe un programa en lenguaje BASIC llamado Gendy, con la ayuda de Marie-Hélène Serra, donde implementa una nueva versión de la síntesis estocástica dinámica, utilizando las ideas descritas anteriormente en su implementación, pero con la diferencia de que utiliza paseos aleatorios secundarios.

Para escribir una obra con el Gendy, Xenakis escribe otro programa llamado PARAG, con el cual consigue tratar un número de salidas del programa Gendy como voces y crea posteriormente secciones musicales con ellas.

El número de voces y sus parámetros parecen haber sido seleccionados a mano por el mismo Xenakis y eran codificados dentro del programa PARAG. El procedimiento por el cual Xenakis consigue esos valores no está del todo claro, pero lo determinó intuitivamente de manera más probable. Xenakis compuso dos obras con esa versión del programa PARAG: Gendy301 y Gendy3 (Luque, 2006, p. 25 - 28).

### 2.1.4. Softwares actuales y utilizados en esta investigación

En la actualidad existen dos *softwares* diferentes que son los más utilizados por compositores y artistas sonoros: SuperCollider y Max/MSP.

SuperCollider (figura 57) es una plataforma para síntesis de audio y composición algorítmica utilizada por músicos, artistas e investigadores que trabajan con sonido basado en un lenguaje de texto. Es un *software* de código abierto, libre para descarga y utilización desarrollado por James McCartney y lanzado originalmente en el 1996. En el 2002, James McCartney lanzó SuperCollider como *software* libre y es actualmente desarrollado por su comunidad y bajo una licencia publica general.

SuperCollider está compuesto de tres componentes principales:

- Scsynth, un servidor de audio en tempo real que consiste en el núcleo de la plataforma. Contiene más de 400 unidades generadoras (UGens) que sirven para analizar, sintetizar y procesar. Permite, de esa manera, la combinación de diversas técnicas de audio normalmente utilizadas, como la síntesis aditiva y sustractiva, FM, Granular, FFT etc. u otras que se pueden desarrollar a través de la combinación de esas unidades generadoras. Los UGens pueden ser escritos en el lenguaje C++ y muchos usuarios han escrito más de 100 nuevas unidades generadoras y los han añadido en el archivo sc3-plugins igualmente disponible para descarga online.
- Sclang es un lenguaje de programación interpretado. Está enfocado en el sonido, pero no se limita a ningún dominio específico. Sclang controla Scsynth a través de un control abierto de sonido. Se puede utilizar para la composición algorítmica y secuenciación, encontrando así nuevos métodos para la síntesis del sonido o conectándose con *hardware* externo como controladores MIDI, redes musicales o displays visuales, así como para experimentos de programación necesarios. Contienen una lista de extensiones creadas por usuarios que se llaman «quarks».
- *scide* es el editor de *sclang* con un sistema de ayuda integrado.

Este *software* será el centro de la experimentación sonora que llevará a cabo esta investigación. Serán desarrollados UGens programados en C++ para alcanzar esos objetivos, así como la misma utilización del programa en sí para todos los objetos sonoros deseados y relacionados con los algoritmos antes mencionados<sup>15</sup>.

---

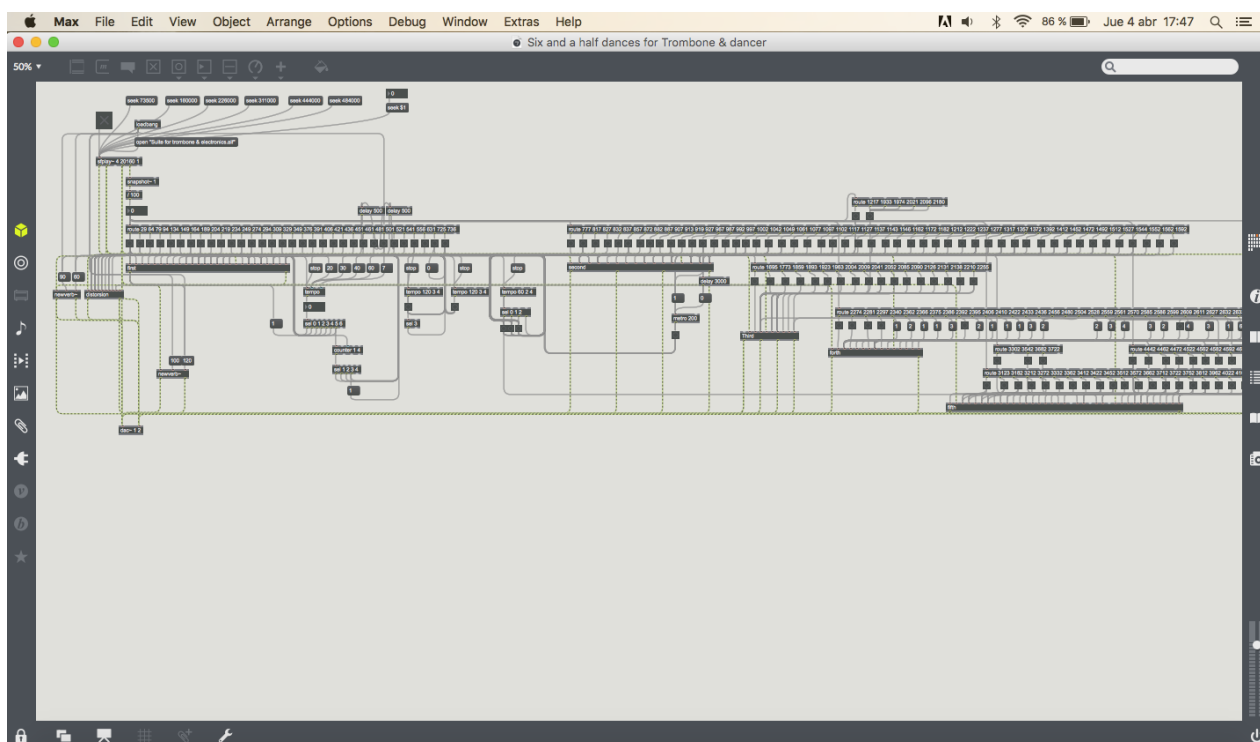
<sup>15</sup> Fuente: página web de SuperCollider: <https://supercollider.github.io>. Visitada: 25/04/2019.



Max/MSP es un entorno gráfico de programación creado para música y multimedia, así como para las necesidades especiales de artistas, educadores e investigadores que trabajan con audio, arte visual con multimedia y con interconexión de *hardware* externo, así como un procesador de audio en tiempo real.

Su nombre hace referencia al compositor Max V. Mathews, uno de los pioneros en la música por ordenador. Su origen tiene fecha en los años 80, donde empezó a ser desarrollado por Macintosh en el IRCAM por Miller Puckette. En 1990 empezó a ser comercializado por Opcode Systems y a partir del 1999 por Cycling '74.

Aunque esos dos softwares tienen básicamente la misma finalidad, o sea, crear la posibilidad de trabajar con procesamiento de audio en tiempo real, difieren en algunos aspectos, como el lenguaje de su utilización, donde SuperCollider se programa a través de códigos introducidos por texto y Max/MSP contiene un lenguaje gráfico en el que los objetos son conectados entre sí para su programación. A la vez que el lenguaje de texto favorece nuestro objetivo en esta tesis, así como por ser SuperCollider un programa de código abierto y con lo cual, permisivo a la programación de los mismos generadores de sonido, Max/MSP tiene otras ventajas como, por ejemplo, su desarrollado apartado de vídeo y la gran facilidad que posee en conectarse con otros programas, sensores, luces y cualquier hardware externo<sup>16</sup>.



**Fig. 64.** El software Max/MSP.

<sup>16</sup> Fuente: página web de Cycling '74: <https://web.archive.org/web/20090609205550/http://www.cycling74.com/twiki/bin/view/FAQs/MaxMSPHistory>. Visitada: 25/04/2019.

## 2.2. Teorizando el sonido: metodología para construir timbre a través del uso de algoritmos

En este apartado, explicaremos las teorías creadas en esta investigación para generar timbres utilizando los algoritmos de dos maneras diferentes. Partiremos de la hipótesis de que «la composición algorítmica genera microsonidos» e intentaremos demostrarla correcta. Utilizaremos el *software* SuperCollider para ejecutar esas teorías electrónicamente y poder escuchar el resultado final.

Adentrarnos, sin embargo, en una definición de timbre es una cuestión delicada, extensa y que conlleva considerar muchos parámetros, no siendo posible de esa manera definirlo solamente por su espectro, pero sí ampliar esa necesidad de definición hacia lo espacial, lo físico, psicológico y cultural.

No obstante, la definición más conocida de timbre y que probablemente más se extendió en su utilización en los últimos 150 años es la de Helmholtz:

Por la calidad de un tono [Klangfarbe] queremos decir esa peculiaridad que distingue el tono musical de un violín del de una flauta o el de un clarinete o el de la voz humana, cuando todos estos instrumentos producen la misma nota en el mismo campo. (Von Helmholtz, 1885/1954, p. 10)

Esa descripción de timbre nos lleva a un ámbito más perceptivo de su reconocimiento y clasificación, menos científico, donde esa subjetividad incluida nos lleva a esa extensión de parámetros para su reconocimiento que hemos citado antes. En este apartado, intentaremos acercarnos al concepto de timbre desde diversos ángulos de apreciación y concepto, desde un punto de vista más técnico y científico, hasta otros conceptos más abarcadores y tangentes al perceptivo.

Por lo tanto, y vista la intención general de esta investigación, entraremos en los conceptos más estructurales del timbre, conceptos que hemos visto cómo fueron históricamente desarrollados por compositores como Köenig, Brün y Xenakis y, desde el punto de vista creativo, centrándonos, además, en las ideas generadoras del timbre, que serán mejor detalladas, así como en el porqué de su resultado timbrístico.

Sin embargo, todos esos parámetros más extensos, y desde el punto perceptivo del timbre, nos ayudarán a desarrollar una encuesta en la cual los encuestados serán invitados a un viaje perceptivo de los productos sonoros de esta investigación, y los resultados serán analizados a través del campo perceptivo del timbre, así como en el

espacial, psicológico y cultural, como antes se ha mencionado, para una comparación entre el autoanálisis de esos productos adquiridos y la percepción timbrística que aportan esos sujetos ajenos a esta investigación.

### 2.2.1. Teoría I

Como primera idea para generar timbre a través de un algoritmo, utilizaremos la respuesta del mismo para generar una onda sonora. Al trabajar con música electrónica, entramos en contacto con muchas formas de onda que solamente podrían ser generadas por un ordenador y no tienen origen en la acústica del mundo real. Una onda sinusoidal, una cuadrada, un diente de sierra y otras son formas de onda que generan timbres específicos y que pueden ser utilizadas o manipuladas para generar otros timbres diferentes.

Si nuestra anterior definición general de timbre establecía esa percepción diferencial de fuentes sonoras, en este apartado nos acercáramos a una definición diferente del timbre; enfocando y definiéndolo dentro de un dominio temporal, lo que nos resultaría en el concepto de forma de onda. Ese concepto está intrínsecamente conectado al timbre a través de los armónicos consonantes o disonantes que genera su vibración a lo largo del tiempo, así como la dinámica, frecuencia y duración de esos armónicos.

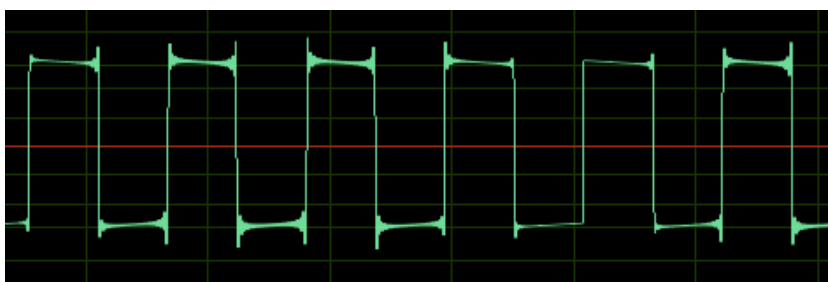
Los intervalos de los armónicos son clasificados como consonantes o disonantes de acuerdo a la complejidad de la relación matemática de la frecuencia sonora de las notas que lo componen. Para que comprendamos ese concepto, los armónicos consonantes son los que respetan la secuencia aritmética de multiplicación por 1, 2, 3, 4 y hasta 16, formando así la secuencia de armónicos que conocemos tradicionalmente. Sin embargo, y como veremos mejor detallado en la teoría II de este apartado, las frecuencias generadas, por ejemplo, por instrumentos de percusión metálicos como los gongs y los ruidos complejos, generan armónicos disonantes, o sea, armónicos que no siguen exactamente esa relación matemática y, por lo tanto, afectan considerablemente a nuestra percepción del timbre y también a nuestra percepción de frecuencia y ruido.

La dinámica que tienen los armónicos generados por una onda que vibra a lo largo de un cierto tiempo también es muy relevante, visto que su sonoridad puede ser más o menos perceptible a lo largo de ese sonido y, por lo tanto, influenciar más o menos en el resultado tímbrico de esa onda sonora. La dinámica es una dimensión muy interesante y digna de experimentación dentro de este apartado y relacionada con nuestra teoría II.

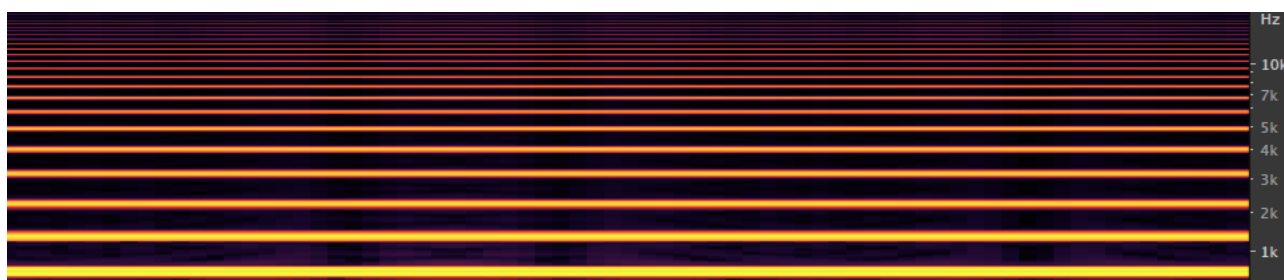
La duración de esos armónicos, así como su momento de inicio, se hace importante especialmente en ondas caóticas, o sea, sin un patrón claro de forma, visto que esa irregularidad puede generar armónicos en ciertos momentos que desaparecerán cuando la forma de onda cambie su trazado y termine por generar otros armónicos con intensidades, duraciones y tiempo de inicio diferentes.

Otra dimensión a tener en cuenta al trabajar con la síntesis no-estándar es justamente la complejidad de la forma de onda. Constatemos, en primera instancia, lo que ya hemos podido leer en la síntesis estocástica de Xenakis, donde él afirma que la periodicidad de una onda conlleva en la percepción de una frecuencia y su forma la de su timbre, así como la forma caótica de la misma será percibida como ruido.

Comparemos las diferentes formas de onda de una frecuencia electrónica con forma de onda periódica (onda cuadrada) y la de un ruido (ruido blanco):



**Fig. 65.** Onda sonora cuadrada.

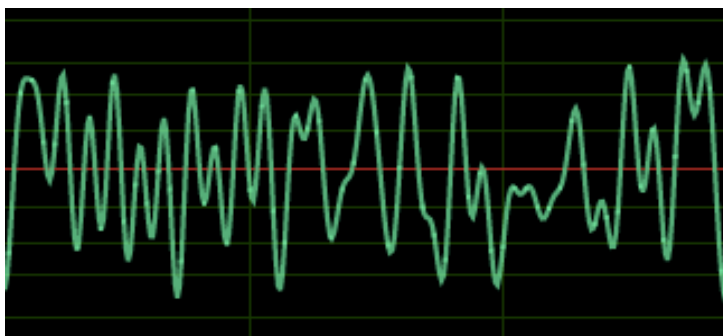


**Fig. 66.** Espectro de una onda sonora cuadrada.

Podemos ver en las figuras anteriores, una forma de onda cuadrada y perfectamente periódica a una frecuencia de 440 Hz. El análisis espectral en la figura anterior nos permite apreciar qué frecuencias resultantes (armónicos o parciales del sonido) aparecen a la vez que es producido en el tiempo. Se puede apreciar cómo los armónicos se forman encima de la frecuencia fundamental y con su proporción regular.

La onda cuadrada analizada puede ser escuchada en el apéndice 5.1., subcarpeta 6 (Ejemplos), archivo número 16.

Si hacemos el mismo proceso con una onda de ruido blanco:



**Fig. 67.** Onda sonora de un ruido blanco abierta en el programa Audition.



**Fig. 68.** Análisis espectral de un ruido blanco.

El ruido blanco recibe ese nombre por su relación con el color blanco, tomando como base el concepto de que el color blanco es la mezcla de todos los colores, definimos el ruido blanco como la mezcla de todas las frecuencias. Si analizamos la irregularidad de su onda, podemos ver claramente la ausencia de patrones en su forma. Eso tiene una consecuencia, que podemos apreciar en el análisis espectral del mismo en mayor o menor intensidad, todo el espectro del sonido está relleno, o sea, se puede apreciar la presencia de todas las frecuencias a la vez, justificando así el nombre al que antes hemos hecho referencia de ruido blanco.

El ruido blanco analizado puede ser escuchado en el apéndice 5.1., subcarpeta 6 (Ejemplos), archivo número 15.

Pasemos ahora a la construcción de nuestra onda utilizando diferentes ecuaciones como idea base para la realización de nuestra síntesis no-estándar. Es importante definir aquí que los dos algoritmos con los cuales vamos a experimentar (Mandelbrot y Gauss), dependiendo de su valor inicial, pueden tener resultados periódicos y caóticos como respuesta, con lo cual podremos constatar nuestra teoría anterior, haciéndoles análisis de forma de onda y espectrales como los anteriores.

Utilicemos el algoritmo de Mandelbrot, por ejemplo, dándole un valor inicial de

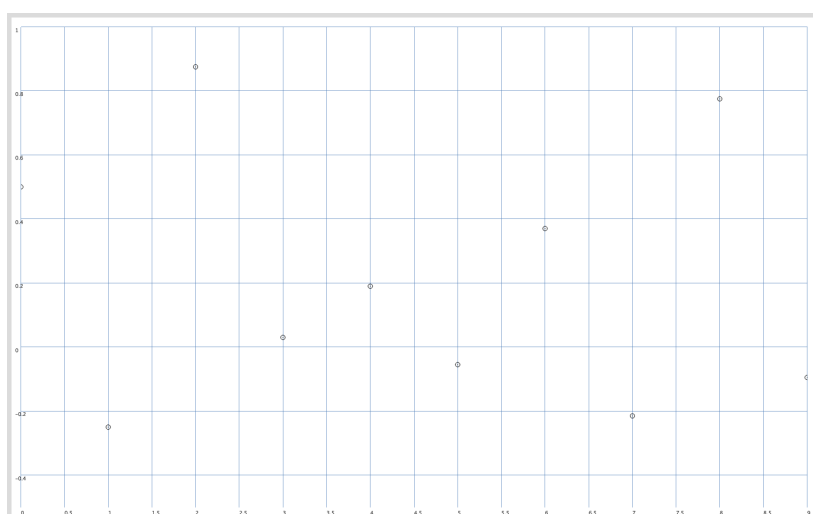
$$z = -1,65$$

obtenemos como respuesta los siguientes valores iniciales:

1, -0,5, 1,75, 0,06, 0,38, -0,11, 0,74, -0,43, 1,55, -0,19, etc.

Podemos observar que esos valores son caóticos, o sea, que no contienen ningún patrón reconocible de inmediato. Eso ocasionará probablemente la sensación de ruido. Como ejemplificaba Iannis Xenakis, la presencia de patrones es lo que da coherencia a un timbre para nuestros oídos. El algoritmo de Mandelbrot, sin embargo, y como antes se analizó, es un algoritmo de autosimilitud, y dependiendo del valor inicial, podemos obtener ambas respuestas caóticas o con presencia de patrones. Para ello, construiremos la onda primeramente para luego analizar los resultados sonoros.

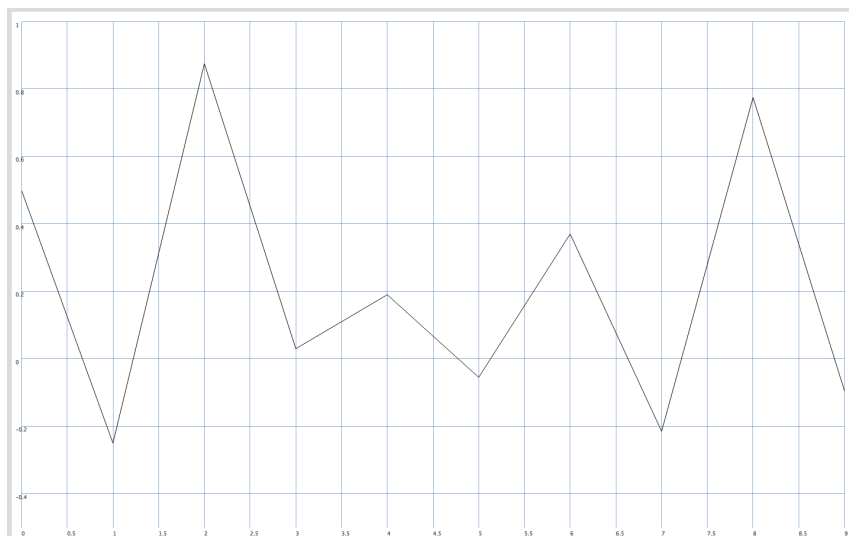
Antes de distribuir los valores que hemos obtenido anteriormente en un plano, es importante tener cuidado con un detalle relevante cuando trabajamos con SuperCollider y, por lo tanto, con electrónica: las formas de onda deben de estar comprendidas entre valores del 1 al -1, donde 0 es el valor medio central, o sea, el centro de la onda sonora. Todos los valores que superen ese umbral serán cortados, teniendo como resultado una distorsión sonora de la onda. Para evitar eso y como solución, sabiendo que los valores respuesta de ese algoritmo no superan el valor 2, dividiremos (al programarla también), todos los valores por 2, o sea, si el máximo no pasa de 2, de esa forma no pasaría del valor 1 que necesitamos. Si distribuimos esos valores en un plano bidimensional, donde los puntos estén espaciados horizontalmente de manera regular y con un valor de 0,5, conseguíamos este resultado, como dibujo inicial de un proyecto de onda:



**Fig. 69.** Distribución bidimensional de los resultados de una cadena de respuestas del algoritmo de Mandelbrot.<sup>17</sup>

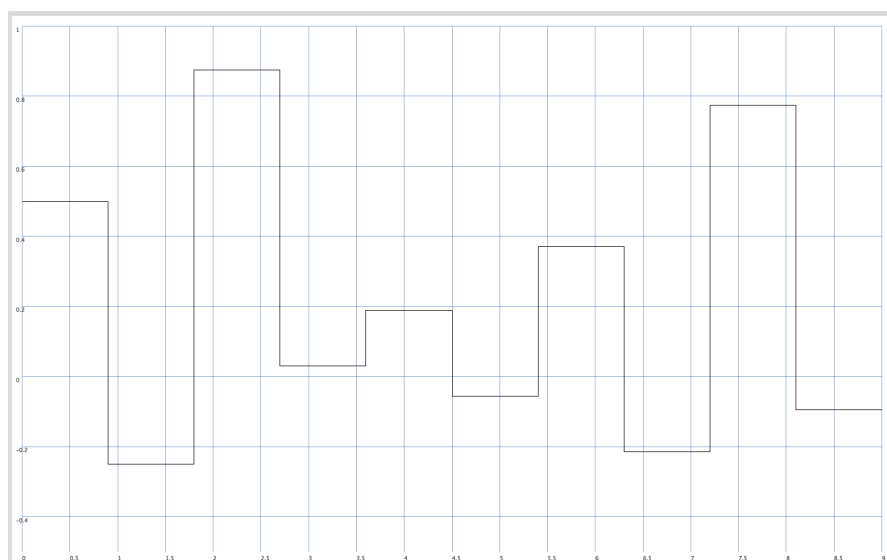
<sup>17</sup> Gráfico generado en SuperCollider

Teóricamente, si unimos estos puntos con una línea (interpolación lineal), tendríamos como resultado nuestra primera forma de onda:



**Fig. 70.** Interpolación de los puntos de la distribución dimensional de la fig. 65.

Obviamente, podemos crear otras posibilidades timbrísticas si cambiamos el espacio entre los puntos o cómo conectamos esos puntos. Esto pasaría si construyéramos una onda sin interpolación lineal:



**Fig. 71.** Onda generada por los puntos distribuidos bidimensionalmente en la fig. 69 y sin interpolación.

Para conseguir la producción del sonido generado por estas dos posibilidades dentro de nuestra teoría I, programamos cuatro ondas sonoras utilizando estos dos

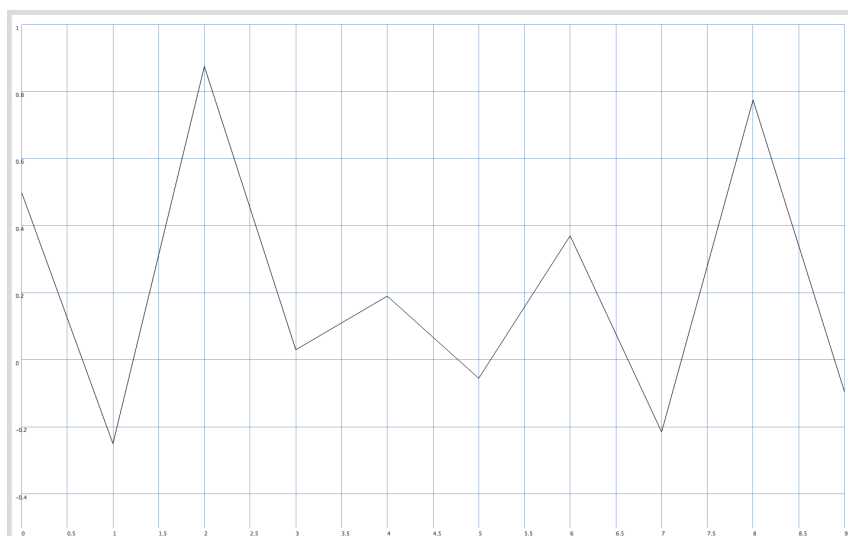
principios de interpolación. Esa programación se hizo en C++ y la detallaremos más adelante.

Los UGens que se produjeron mediante nuestra experimentación fueron:

- MandelBrot.ar (no-interpolada)
- MandelBrotL.ar (interpolada linealmente)
- Gauss.ar (no-interpolada)
- GaussL.ar (interpolada linealmente)

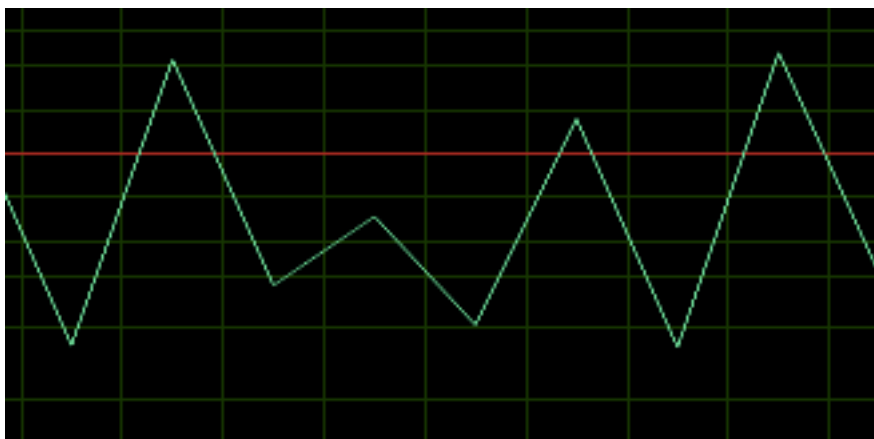
Las cuatro ondas poseen características tímbricas diferentes y están, tanto los UGens como un ejemplo sonoro de las mismas, grabados en el apéndice I digital (5.1. - CD) de esta investigación.

Analicemos ahora los resultados finales de las ondas. Primero, averigüemos la similitud del proyecto de onda (figura 69) con la onda sonora que hemos creado, MandelBrotL a 100Hz y  $c = -1,65$  para averiguar si hemos conseguido alcanzar la misma forma de onda:



**Fig. 70 (bis).** Interpolación de los puntos de la distribución dimensional de la fig. 69.



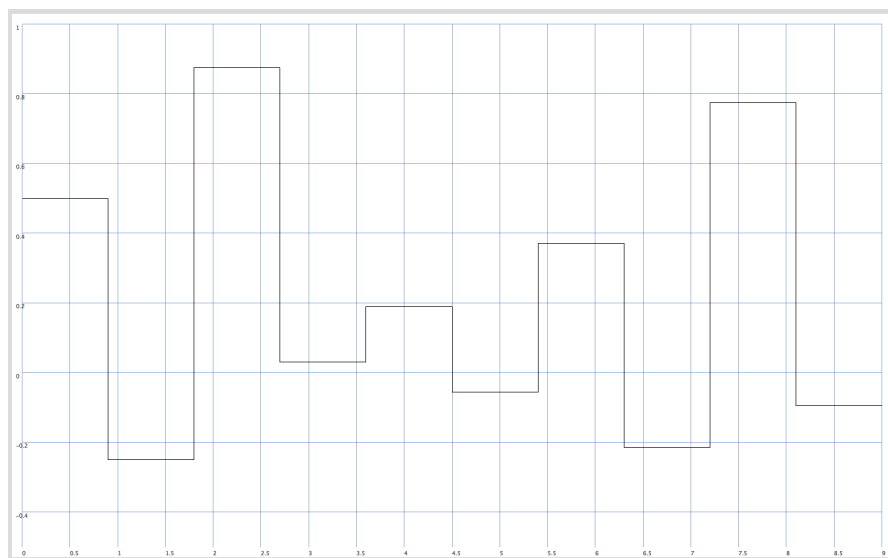


**Fig. 72.** Foto de la forma de onda MandelBrotL 100 Hz y  $c = -1,65$  abierta en el programa Audition.

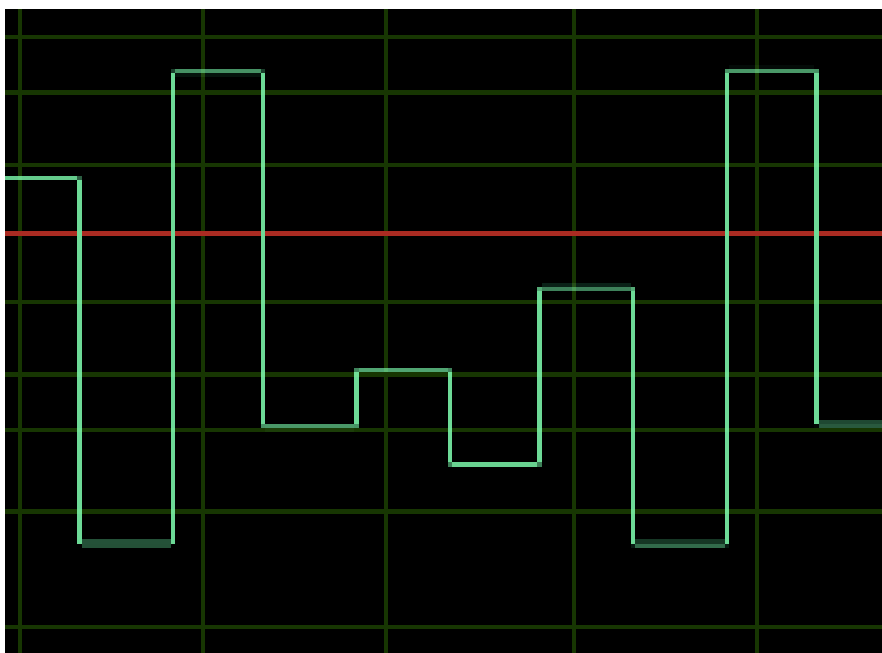
Como podemos observar, la semejanza entre las dos formas es absoluta y podemos considerar satisfactorio el resultado de nuestra experimentación.

La grabación de la onda MandelBrotL a 100Hz y  $c = -1,65$  está ubicada en el apéndice 5.1., en la subcarpeta 6 (ejemplos) y como archivo número 6.

Comparemos igualmente y de la misma forma, la onda MandelBrot (no-interpolada) con el proyecto que se realizó en la figura 69:



**Fig. 71 (bis).** Onda generada por los puntos distribuidos bidimensionalmente en la fig. 69 y sin interpolación.

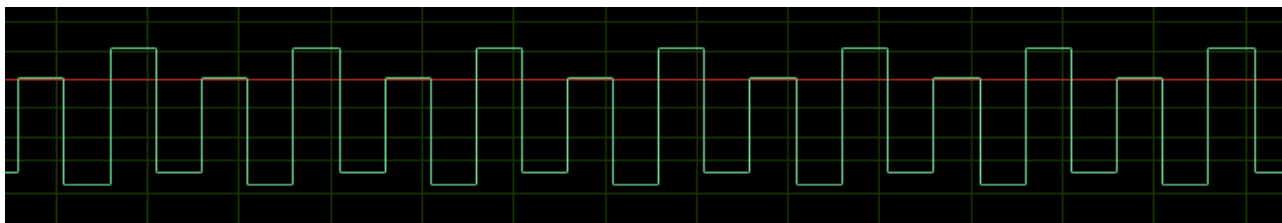


**Fig. 73.** Foto de la forma de onda MandelBrot 100 Hz y  $c = -1,65$  abierta en el programa Audition.

Se puede notar igualmente la similitud de la foto de la onda generada por SuperCollider utilizando Mandelbrot a 100 Hz y  $c = -1,65$  y el proyecto que realizamos antes. Podemos considerar igualmente satisfactorio el resultado final de nuestra experimentación.

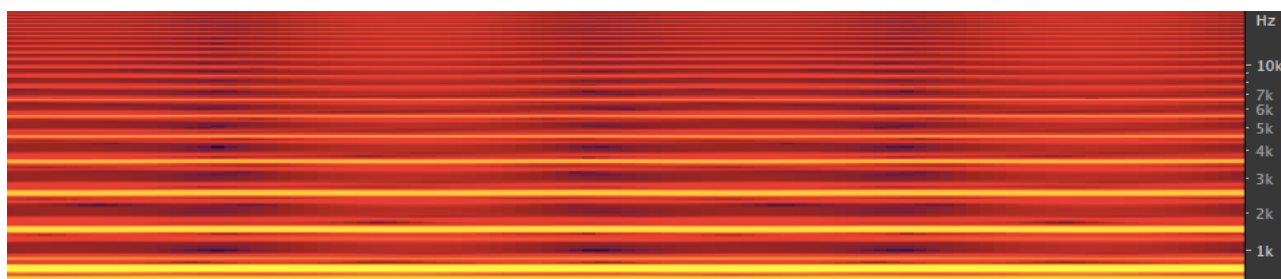
Vale la pena ahora, y después de averiguar que el resultado de realización de la onda es satisfactorio, analizar el resultado sonoro y averiguar el abordaje científico de timbre que hemos expuesto antes, donde exponemos que la onda posee respuestas periódicas así como caóticas y que estarían conectadas a la percepción del timbre como una frecuencia o como un ruido respectivamente. Comparemos también la diferencia de timbre entre una onda interpolada y otra no-interpolada, generando material sonoro siempre en la misma frecuencia, pero con números de  $c$  iniciales diferentes.

El primer ejemplo sería con una onda no-interpolada a 1000 Hz y con  $c = 1,3$ , que coincide con el archivo número 2 de la subcarpeta 6 (Ejemplos) de nuestro apéndice electrónico 5.1. Si escuchamos el archivo, podemos hacernos con la idea del timbre que posee la onda MandelBrot y podemos percibir la presencia clara de una frecuencia constante. Si analizamos la onda, podemos ver su periodicidad absoluta, así como la no-interpolación de los puntos que genera el algoritmo como respuesta:



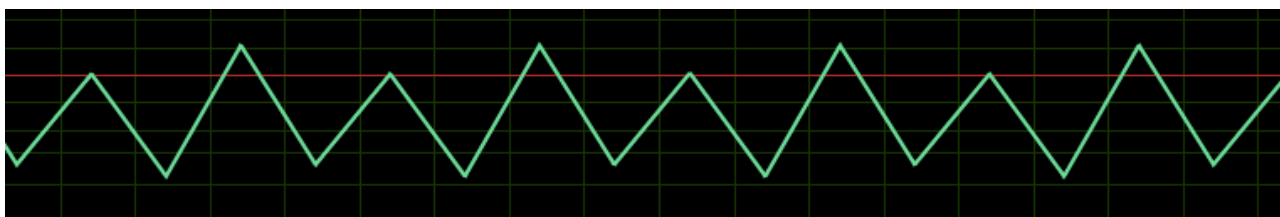
**Fig. 74.** Foto de la forma de onda MandelBrot a 1000 Hz y  $c = -1,5$  abierta en el programa Audition.

Si observamos su espectro, podemos ver que, comparándolo con el de una onda cuadrada, los armónicos siguen estando claros, pero hay una presencia más ancha de los mismos, que abarca por lo tanto más frecuencias y tiene como resultado un sonido más ruidoso que el de la onda cuadrada. Podemos ver claramente la fuerza del armónico de octava inferior a la frecuencia de 1000 Hz, que se puede escuchar si prestamos atención, en el archivo grabado de la misma onda:



**Fig. 75.** Análisis espectral de la onda MandelBrot a 1000 Hz y  $c = -1,5$ .

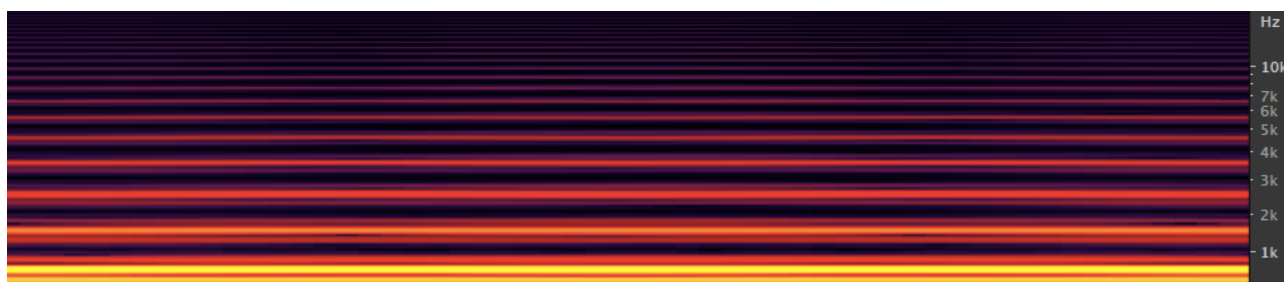
Hagamos ahora el mismo proceso con la onda MandelBrotL, o sea, interpolada y con la misma frecuencia (1000 Hz) y valor de  $c = -1,3$ :



**Fig. 76.** Foto de la forma de onda MandelBrotL a 1000 Hz y  $c = -1,3$  abierta en el programa Audition.

Comparemos esta forma de onda con la anterior (figura 74), visto que están construidas con la misma respuesta del algoritmo. Se nota la periodicidad absoluta de la onda, pero como se ve totalmente diferente de la anterior, simplemente por estar interpolada. Eso no se nota sólo visualmente, pero también sonoramente. Esa onda está grabada en el apéndice 5.1. en la subcarpeta 6 (ejemplos) y archivo número 5. Podemos compararla auditivamente escuchando las dos e intentar apreciar sus diferencias sonoras,

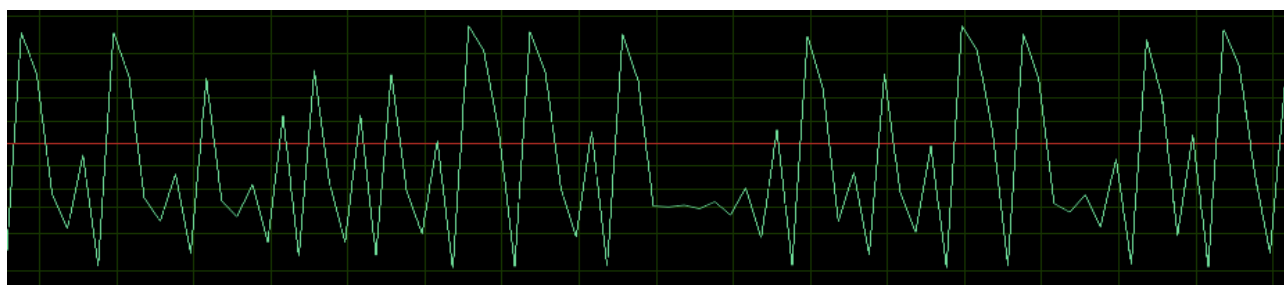
pero analicemos esta onda espectralmente, para que podamos comparar científicamente las dos ondas:



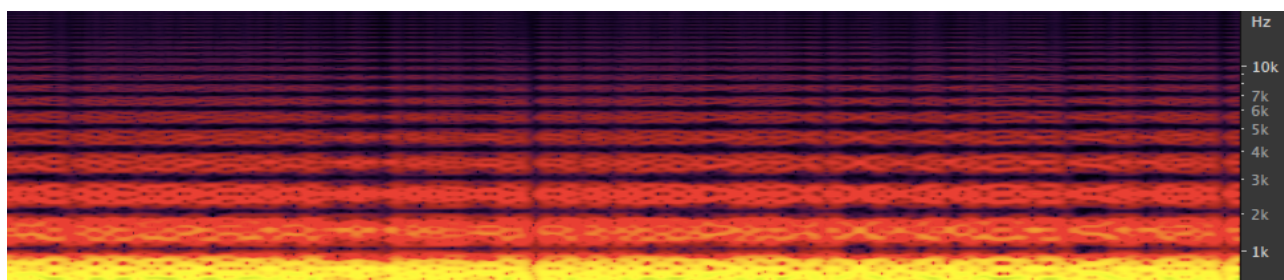
**Fig. 77.** Análisis espectral de la onda MandelBrotL a 1000 Hz y  $c = -1,3$ .

Aquí podemos ver claramente la distribución de armónicos y de manera mucho más homogénea, donde varias capas de frecuencia quedan en negro, o sea, sin ningún tipo de sonido, lo que torna esta onda mucho más cerca a una frecuencia claramente detectable a nuestros oídos y menos ruidosa que la anterior.

Comparemos ahora la misma onda MandelBrotL (interpolada) utilizando un valor inicial que genere respuestas más caóticas:



**Fig. 78.** Foto de la forma de onda MandelBrotL a 1000 Hz y  $c = -1,95$  abierta en el programa Audition.

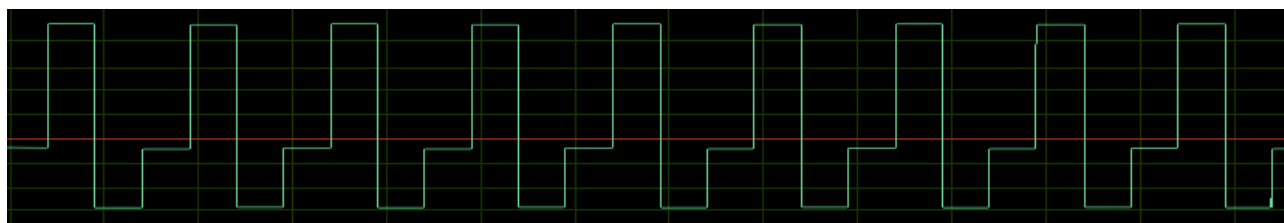


**Fig. 79.** Análisis espectral de la onda MandelBrotL a 1000 Hz y  $c = -1,95$ .

Analicemos las diferencias de esta onda con las otras; donde podemos ver la ausencia de patrón en su continuidad, constatando así la respuesta caótica del algoritmo, sin embargo, y a larga escala, podemos percibir cómo aun así existen franjas de parciales que pueden ser vistas claramente, apuntando así quizás a una periodicidad a larga

escala, pero es evidente aquí la inconstancia de las líneas de parciales, que están conectadas a su dinámica (los puntos negros dentro de esas franjas indican que la frecuencia se apaga) y tiempo de inicio y duración de esos parciales, que aunque se expandan dentro de una cierta franja de frecuencias no son constantes como las anteriores. Todos esos factores sumados provocan la sensación de ruido que da la onda, aunque se aleje mucho de ruido blanco, como podemos comparar con la figura 68, como se constata al escucharla y cotejarla con el ruido blanco. Esta onda MandelBrotL a 1000 Hz y  $c = -1,95$  está grabada en el apéndice 5.1., subcarpeta 6 (Ejemplos) y como archivo sonoro número 4.

La onda experimental desarrollada con el mapa iterativo de Gauss, tiene otras peculiaridades muy diferentes que las de Mandelbrot. El algoritmo tiende a una estabilización rápida hacia un patrón de dos números, básicamente para todos los valores iniciales, y a patrones de cuatro valores para algunos otros valores iniciales. Esos valores se estabilizan igualmente en el campo positivo, teniendo respuestas negativas, cuando las haya, muy cercanas al 0. Esta característica desemboca en una peculiaridad: se desarrolla como una onda cuadrada, pero solo con valores positivos, cuando no está interpolada y se torna onda triangular, igualmente solo la mitad positiva de la misma, cuando está interpolada. Podemos ver en las siguientes figuras, cómo la onda se estabiliza inmediatamente en un dibujo periódico:



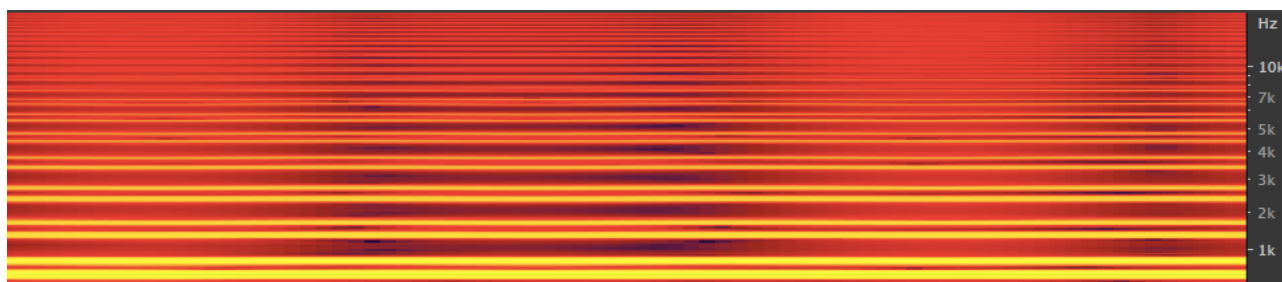
**Fig. 80.** Foto de la forma de onda Gauss a 1000 Hz,  $a = -8,7$  y  $b = -0,4$  abierta en el programa Audition.

Si comparamos lo que vemos con los valores matemáticos de respuesta del algoritmo a valores iniciales  $a = -8,7$  y  $b = -0,4$ , podemos entender lo que está pasando en la onda:

0, 0,6, -0,36, -0,07, 0,56, -0,33, -0,02, 0,6, -0,35, -0,06, 0,56, -0,34, -0,03, 0,59, -0,35, -0,06, 0,57, -0,34, -0,03, etc.

Podemos observar como los valores se juntan en un patrón de tres números, aunque con una mínima diferencia entre ellos. Esa diferencia es tan pequeña que casi no

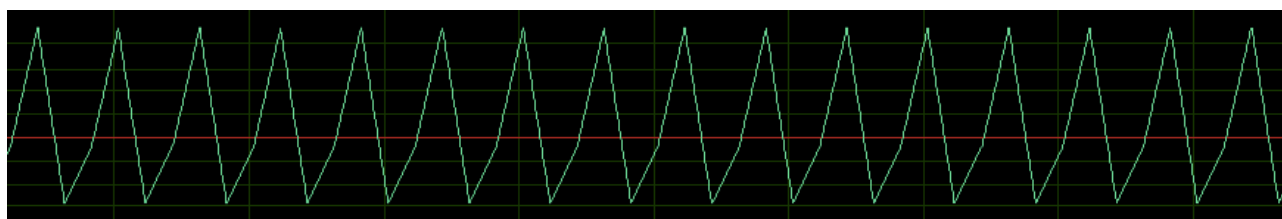
se aprecia al mirar la onda, pero si miramos su espectro, podemos ver que tiene su efecto tímbrico:



**Fig. 81.** Análisis espectral de la onda Gauss a 1000 Hz,  $a = -8,7$  y  $b = -0,4$ .

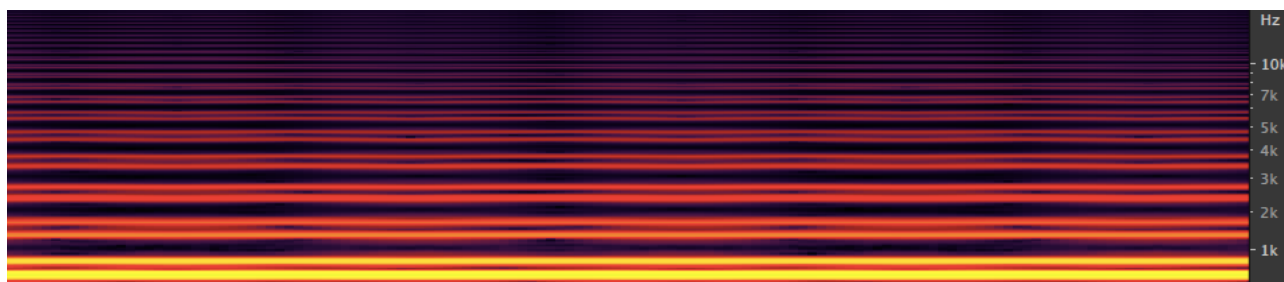
Podemos apreciar cómo, al igual que con la onda MandelBrot no-interpolada, que el espectro se llena de armónicos, lo que nos resulta en un sonido más ruidoso, pero percibimos también que esa pequeña variación de la forma de onda crea vacíos negros en algunas áreas del espectro, justamente porque genera frecuencias que aparecen y desaparecen según esos pequeños cambios entre esos valores periódicos. La onda está grabada en el apéndice 5.1., en la subcarpeta 6 (Ejemplos) y como archivo sonoro número 7 y, si la escuchamos, sin embargo y a pesar del espectro tan lleno que genera, se puede percibir una frecuencia clara, aunque con un timbre un poco rústico.

Comparemos la misma onda con la misma frecuencia, pero con los valores interpolados:



**Fig. 82.** Foto de la forma de onda GaussL a 1000 Hz,  $a = -8,7$  y  $b = -0,4$  abierta en el programa Audition.

Podemos apreciar cómo sigue siendo un patrón de tres valores, lo que termina por formar una onda triangular desproporcionada, pero mucho más agradable a la escucha (menos ruidosa) y con su frecuencia claramente perceptible. Miremos su espectro:



**Fig. 83.** *Análisis espectral de la onda Gauss a 1000 Hz,  $a = -8,7$  y  $b = -0,4$ .*

El espectro está mucho más limpio y regular, donde los parciales se ven con mucha más claridad y precisión, aunque se notan igualmente esos huecos de sonido, ahora más pequeños que en la onda no-interpolada, pero expresando igualmente ese pequeño cambio entre los tres valores repetidos del patrón.

Podemos constatar, llegados a este punto, que todas las teorías de construcción de las ondas a través de la síntesis no-estándar unida a la composición algorítmica se demuestran correctas, ampliando ese análisis del timbre a través de las diferentes formas de onda y sus espectros, constatando cómo esos parámetros tan importantes como los armónicos y su altura, dinámica y tiempo de inicio y duración afectan al timbre final que define sonoramente la onda en sí.

Terminamos este apartado de experimentación de la teoría I con esas demostraciones y diferentes análisis de los resultados obtenidos dentro del foco de análisis tímbrico científico y podemos deducir que los primeros resultados son satisfactorios. Probaremos otras investigaciones de estos timbres y desde otros focos diferentes en el apartado 3 conectados a nuestra encuesta.

Por ahora pasemos a identificar todos los procesos técnicos que hemos desarrollado en la experimentación para producir como objeto final las ondas antes mencionadas.

### **2.2.1.1. Realización de las ondas de la teoría I paso a paso**

Después de haber entendido la teoría I y su lógica de cómo construir una onda sonora a partir de un algoritmo en concreto, vale decir que su realización no es del todo sencilla. Al intentar hacerlo dentro del mismo SuperCollider, sencillamente a través de una rutina, o sea, de la repetición muy rápida de un código que hace el cálculo necesario para obtener el resultado del algoritmo y posteriormente procesa su sonido, constatamos que la velocidad de sampleo de SuperCollider es insuficiente para realizar esas operaciones y

el programa termina por bloquearse. Eso pasa porque SuperCollider utiliza un servidor que trabaja encima del sistema operativo y, por lo tanto, son demasiados pasos en un tiempo muy corto para que toda esa información sea procesada.

Al consultar con expertos sobre cómo se podría solucionar ese problema de la mejor manera, todos coincidían en que la única forma de hacerlo sería construyendo un UGen que pudiera trabajar en el lenguaje del sistema operativo, o sea, en C++.

Para ello, muchos aconsejan que se los encomendemos directamente a expertos que estén acostumbrados a programar ese tipo de objetos. Sin embargo, y visto que esta es una investigación doctoral, decidí informarme sobre ello e intentar de esa forma programar el UGen, aunque fuera tarea complicada y se necesite conocer y seguir unos cuantos pasos, los cuales no están del todo claros ni detallados en las páginas web o forums de discusión de SuperCollider sobre la construcción de UGens.

Por lo tanto, cuando se decide adentrarse en esa pequeña aventura, aparte de una gran cantidad de horas de experimentación, hay que atar unos cuantos cables hasta que se termina por entender o autoconfeccionar un proceso de creación de esos archivos (UGens). Vale decir, llegados a este punto, que todos los procesos aquí descritos son válidos únicamente para usuarios de MacOS, visto que esos mismos procesos utilizarían otros *softwares* completamente diferentes en otros sistemas operativos, *softwares de los* cuales no tengo conocimiento de su funcionamiento y, por lo tanto, no puedo hacer una descripción correcta como la que vamos a realizar en este apartado.

Dicho lo anterior, el primer lugar en la web donde se debe empezar es en la misma página de SuperCollider y sus diversos tutoriales de confección de UGens. *Writing Unit Generators*<sup>18</sup> es el tutorial oficial de SuperCollider que nos guía a través de los conceptos básicos de la escritura y realización de los UGens:

---

<sup>18</sup> <http://doc.sccode.org/Guides/WritingUGens.html>. Visitado el 25/05/2020.



SuperCollider | Browse | Search | Indexes ▼ Table Of Contents ▼

Guides | Internals

## Writing Unit Generators

Get started with writing unit generators

See also: [Server Plugin API](#)

SuperCollider has a vast library of unit generators that can be assembled in unlimited ways, but sometimes even those aren't sufficient. You may have a need for an unusual signal processing algorithm, or you're running into efficiency problems that can be solved by condensing parts of your SynthDef into a single UGen.

UGens are defined in server plugins written in C++. Server plugins are not to be confused with quarks, which extend the SuperCollider language. UGens exist more or less independently of the interpreter and you don't need much familiarity with SC to write them.

Writing UGens is not too difficult, but it's arguably far less convenient and intuitive than the high-level tools that SuperCollider provides. You'll need a build system and a good amount of boilerplate code -- even fairly basic signal processing operations can require a lot of code. You don't have an instant live coding environment, and mistakes can easily crash the server. SuperCollider's UGens are stable and well-tested, and custom UGens are best viewed as a last resort for when the limitations of SC are impassable.

### Pseudo-UGens

Before we proceed to the real UGens, we'll take a quick detour for the sake of completeness. A pseudo-UGen is a bit of SuperCollider code that abbreviates a certain configuration of UGens that gets used repeatedly. A pseudo-UGen is a class that superficially resembles a UGen class, but it only returns a composition of existing UGens. It has no efficiency savings, but it does save typing.

The below example has only a .ar method, but you can just as easily have both .ar and .kr methods.

```

BoringMixer {
  *ar { arg left, right;
    (left + right) * 0.5;
  }
}

```

Examples of pseudo-UGens found in SC include `BLowPass4` and `BHiPass4`, which break down into `SOS` UGens.

There are very few restrictions on what these classes can contain, but you should keep the following in mind:

- It is courteous to leave a note in your class's help file that identifies it as a pseudo-UGen.
- To avoid confusion, pseudo-UGens should not inherit from the base class `UGen`.
- A `SynthDef` can only have two `LocalIn/LocalOut` pairings — one for control rate and one for audio rate. Putting `LocalIn` and `LocalOut` in a pseudo-UGen is a bad idea, as it could interfere with other feedback loops in the `SynthDef`.

### Basics of UGens

A (real) UGen needs two components: a plugin for the server, and a class for the language. The class goes in an ordinary \*.ac file, and defines the interface for your UGen in the language. This class is generally just a few lines of code that ultimately call the class method `UGen::multiNew`.

The server plugin is where the actual UGen behavior is defined. It is given by a dynamically loaded library written in C++, whose format is platform-dependent:

- \*.so for \*nix
- \*.dll for Windows
- \*.scx for macOS

**Fig. 84.** Página tutorial de SuperCollider.

El tutorial no es del todo claro en los pasos a seguir, pero en el apartado de *Example Plugins* nos deja la referencia de otra página web (GitHub) con ejemplos de construcción de UGens<sup>19</sup>, que es clave para la comprensión del proceso, aunque tampoco sea del todo clara en cómo proceder para su construcción. Sin embargo, después de una lectura al detalle, se puede llegar a entender la dirección que debemos seguir:

github.com

Why GitHub? Team Enterprise Explore Marketplace Pricing Search Sign in Sign up

supercollider / example-plugins Watch 9 Star 28 Fork 7

Code Issues 3 Pull requests 2 Actions Projects 0 Security 0 Insights

Branch: master example-plugins / 01a-BoringMixer / Create new file Find file History

dyfer updated CMakeLists for building with Supernova Latest commit 24b8b06 on 5 Jan 2018

File	Description	Time
BoringMixer.cpp	expand on explanation of why priming the pump is necessary	4 years ago
BoringMixer.sc	add example 01b demonstrating Tim's C++ header	4 years ago
CMakeLists.txt	updated CMakeLists for building with Supernova	2 years ago

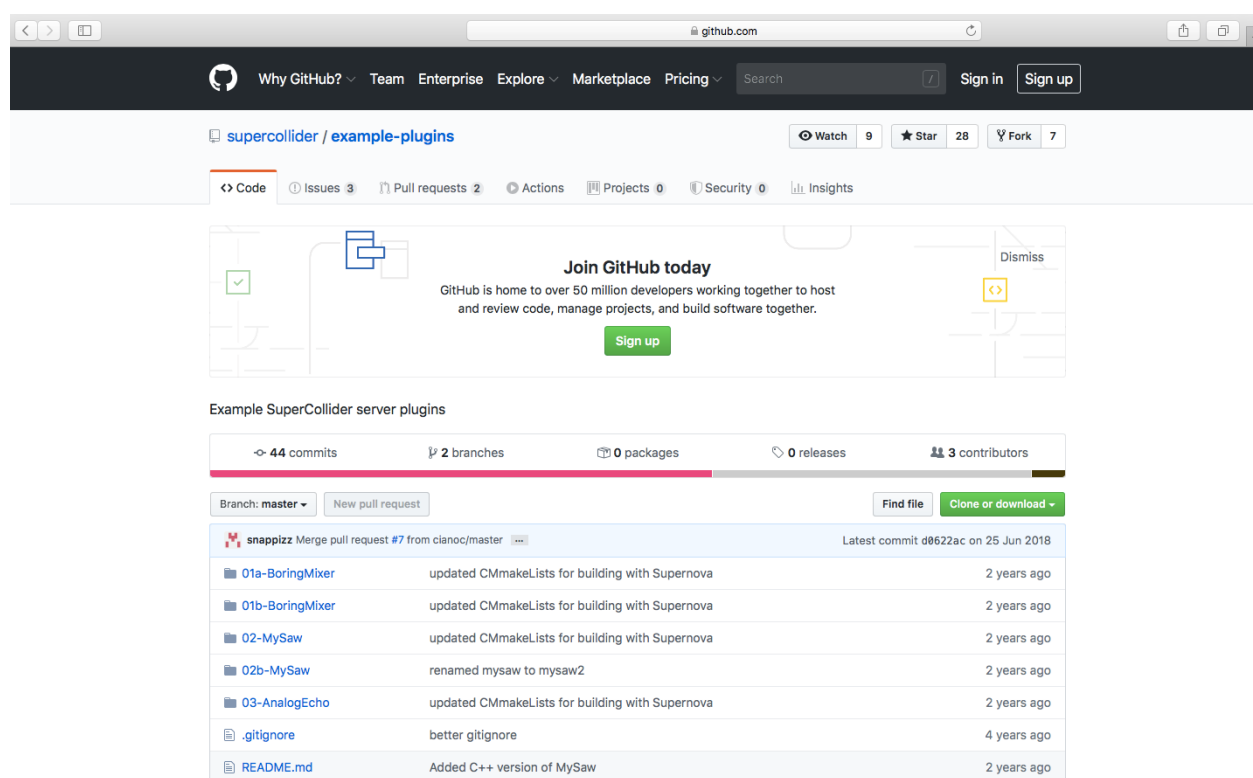
© 2020 GitHub, Inc. Terms Privacy Security Status Help Contact GitHub Pricing API Training Blog About

**Fig. 85.** Página web de GitHub con los plugins de ejemplo para construir UGens.

<sup>19</sup> <https://github.com/supercollider/example-plugins>. Visitado el 25/05/2020.

En primer lugar y, analizando todos los archivos registrados en la página de GitHub, se puede advertir la presencia de archivos .scx, que es la extensión utilizada para los UGens en SuperCollider. Obviamente, no es una extensión de uso común, y su compilación en C++ utilizando el programa Xcode, por lo tanto, no es posible sin construir anteriormente un proyecto específico para que se compilen archivos .scx. Ese proyecto ya está confeccionado en la página de GitHub (figura 85) y puede ser descargado gratuitamente para su utilización. Contiene una simple extensión de texto (.txt) y se llaman CMakeLists. Su manipulación por lo tanto se puede hacer en cualquier ordenador, con un editor de texto común.

Si abrimos la página web de GitHub, en el primer ejemplo que tenemos (01A - Boring Mixer), encontramos inmediatamente ese archivo de texto de CMake:



**Fig. 86.** Página de GitHub que contiene los archivos descargables del plugin de ejemplo Boring mixer.

Para que entendamos esos archivos que aparecen en la figura 86, que son archivos de construcción de un UGen de SuperCollider; el primero y con extensión .cpp es el código en C++ que tenemos que desarrollar, modificar o manipular en el programa Xcode para su futura compilación como archivo .scx, o sea, un UGen de SuperCollider. El código con extensión .sc es un controlador que debe ser escrito en el mismo SuperCollider y guardado posteriormente en la carpeta externa de *extensions*, para que el programa tenga la información necesaria de cómo controlar los parámetros modificables

del UGen. Llegaremos posteriormente a estos dos archivos, nos centramos de momento en el último, CMakeLists.txt. Si descargamos esos archivos y los abrimos, el texto interior del archivo sería:

```

1. set(FILENAME "BoringMixer.cpp") #specify the .cpp file here

2. cmake_minimum_required (VERSION 2.8)

3. get_filename_component(PROJECT ${FILENAME} NAME_WE) #automatically sets
project name from the filename

# set(PROJECT "my_name") #alternatively set project name manually

4. message(STATUS "Project name is ${PROJECT}")

5. project (${PROJECT})

6. include_directories(${SC_PATH}/include/plugin_interface)

7. include_directories(${SC_PATH}/include/common)

8. include_directories(${SC_PATH}/common)

9. set(CMAKE_SHARED_MODULE_PREFIX "")

10. if(APPLE OR WIN32)

11. set(CMAKE_SHARED_MODULE_SUFFIX ".scx")

12. endif()

13. option(SUPERNOVA "Build plugins for supernova" OFF)

14. if (SUPERNOVA)

15.   include_directories(${SC_PATH}/external_libraries/nova-tt)

      # actually just boost.atomic

16.   include_directories(${SC_PATH}/external_libraries/boost)

17.   include_directories(${SC_PATH}/external_libraries/boost_lockfree)

18.   include_directories(${SC_PATH}/external_libraries/boost-lockfree)

19. endif()

20. option(CPP11 "Build with c++11." ON)

21. if(CMAKE_CXX_COMPILER_ID STREQUAL "Clang")

```

```
    set(CMAKE_COMPILER_IS_CLANG 1)
```

```
22. endif()
```

```
# The below monstrosity sets compiler flags for SSE (Streaming SIMD Extensions).
Among many other things, SSE protects
```

```
# against denormal numbers, which are known to cause glitchy audio in some cases.
```

```
# Some processors do not support SSE and will produce errors if you try to add SSE flags,
so we also have to introduce
```

```
# conditional logic to guard against those errors.
```

```
# It's a real mess, and generally there's no need to touch it :)
```

```
23. if(CMAKE_COMPILER_IS_GNUCXX OR CMAKE_COMPILER_IS_CLANG)
```

```
24.   add_definitions(-fvisibility=hidden)
```

```
25.   include (CheckCCompilerFlag)
```

```
26.   include (CheckCXXCompilerFlag)
```

```
27.   CHECK_C_COMPILER_FLAG(-msse HAS_SSE)
```

```
28.   CHECK_CXX_COMPILER_FLAG(-msse HAS_CXX_SSE)
```

```
29.   if (HAS_SSE)
```

```
30.     set(CMAKE_C_FLAGS "${CMAKE_C_FLAGS} -msse")
```

```
31.   endif()
```

```
32.   if (HAS_CXX_SSE)
```

```
33.     set(CMAKE_CXX_FLAGS "${CMAKE_CXX_FLAGS} -msse")
```

```
34.   endif()
```

```
35.   CHECK_C_COMPILER_FLAG(-msse2 HAS_SSE2)
```

```
36.   CHECK_CXX_COMPILER_FLAG(-msse2 HAS_CXX_SSE2)
```

```
37.   if (HAS_SSE2)
```

```
38.     set(CMAKE_C_FLAGS "${CMAKE_C_FLAGS} -msse2")
```

```
39.   endif()
```

```
40.   if (HAS_CXX_SSE2)
```

```

41.     set(CMAKE_CXX_FLAGS "${CMAKE_CXX_FLAGS} -msse2")
42. endif()
43. CHECK_C_COMPILER_FLAG(-mfpmath=sse HAS_FPMATH_SSE)
44. CHECK_CXX_COMPILER_FLAG(-mfpmath=sse HAS_CXX_FPMATH_SSE)
45. if (HAS_FPMATH_SSE)
46.     set(CMAKE_C_FLAGS "${CMAKE_C_FLAGS} -mfpmath=sse")
47. endif()
48. if (HAS_CXX_FPMATH_SSE)
49.     set(CMAKE_CXX_FLAGS "${CMAKE_CXX_FLAGS} -mfpmath=sse")
50. endif()
51. if(NATIVE)
52.     add_definitions(-march=native)
53. endif()

    # Plugin headers require C++11, which must be explicitly enabled for gcc and clang.
54. set(CMAKE_CXX_FLAGS "${CMAKE_CXX_FLAGS} -std=c++11")
55. if(CMAKE_COMPILER_IS_CLANG)
56.     set(CMAKE_CXX_FLAGS "${CMAKE_CXX_FLAGS} -stdlib=libc++")
57. endif()
58. endif()
59. if(MINGW)
60.     set(CMAKE_C_FLAGS "${CMAKE_C_FLAGS} -mstackrealign")
61.     set(CMAKE_CXX_FLAGS "${CMAKE_CXX_FLAGS} -mstackrealign")
62. endif()
63. add_library(${PROJECT} MODULE ${FILENAME})
64. if(SUPERNOVA)
65.     add_library(${PROJECT}_supernova MODULE ${FILENAME})

```

```

66. set_property(TARGET ${PROJECT}_supernova
67.             PROPERTY COMPILE_DEFINITIONS SUPERNOVA)
68. endif()
69. add_library(${PROJECT} MODULE BoringMixer.cpp)

```

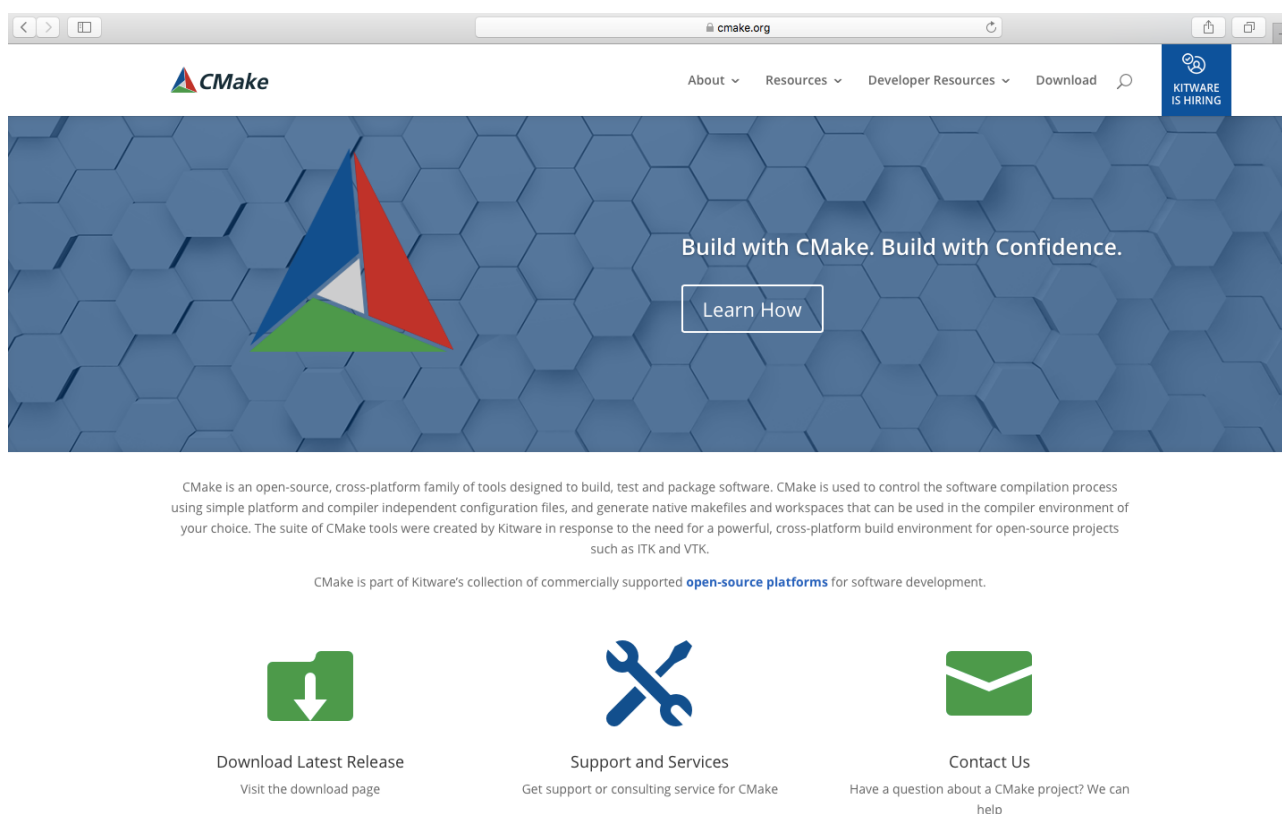
Nos vemos con un lenguaje novedoso de ordenador, que tiene algunos comentarios indicando funciones del texto, pero es bastante difícil comprender qué puede hacer, pero en realidad, la parte buena de este primer paso para la compilación de un UGen de SuperCollider es que no necesitamos en realidad comprender el CMake, ni el lenguaje antes expuesto. Lo único necesario para este paso es que cambiemos el nombre del archivo de *BoringMixer* por el nombre que queremos para nuestra onda, en este caso, vamos a ejemplificar con la onda Gauss. Cambiamos por lo tanto en las líneas 1 y 69 los nombres como antes hemos indicado y guardamos el archivo con el nombre CMakeLists.txt en una carpeta vacía.

Tenemos que descargar el archivo BoringMixer.ccp igualmente y cambiar su nombre a Gauss (Gauss.ccp o el nombre que se elija para el UGen final). El archivo debe ser ubicado en la misma carpeta que el CMakeLists.txt.

El próximo paso es descargar el programa CMake<sup>20</sup> que es un programa de *cross-platform*, o sea, que conecta dos programas diferentes, como en este caso, el Xcode con SuperCollider:

---

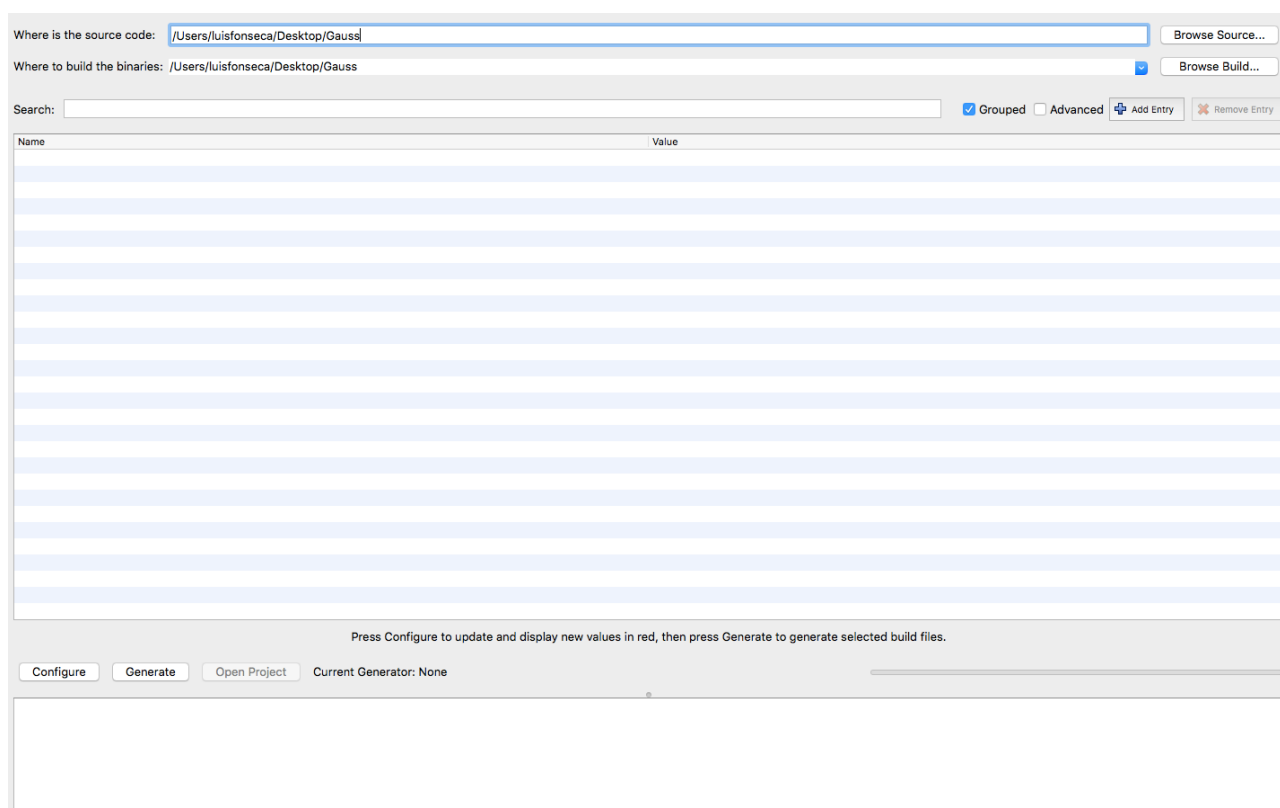
<sup>20</sup> <https://cmake.org>. Visitado el 25/05/2020.



**Fig. 87.** Página web de descarga gratuita del software CMake.

El Xcode es un programa de descarga gratis para Mac frecuentemente utilizado para compilar *apps* y archivos en general, trabajando en los lenguajes más comunes para ello, como en este caso, el C++, pero antes de adentrarnos a la utilización del Xcode, que es el segundo paso para compilar un UGen, centrémonos en completar este primer paso, que empieza por descargar y abrir el programa CMake, para que este pueda leer ese archivo .txt que hemos guardado y compilar, a través de la información que este contiene, un proyecto de Xcode.

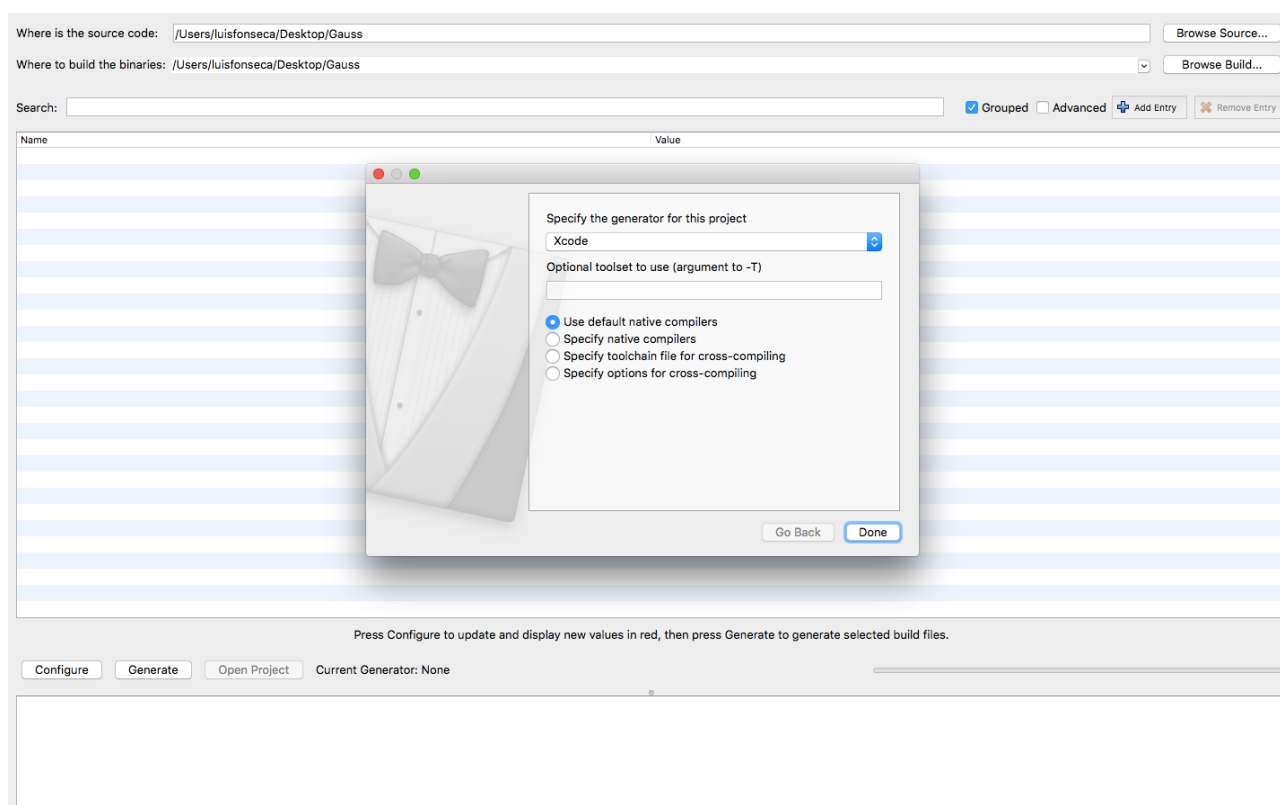
Al abrir el CMake, nos encontramos con esta pantalla:



**Fig. 88.** Pantalla inicial del programa CMake.

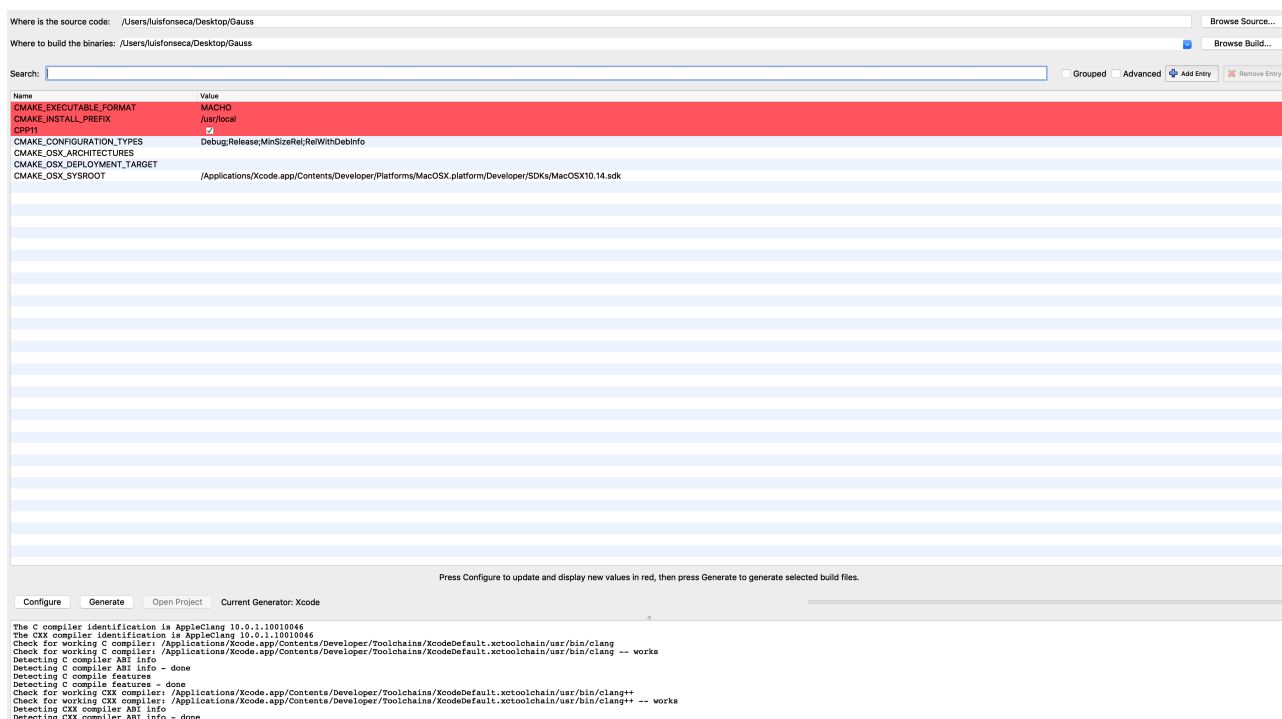
Lo que debemos hacer en este programa es sencillamente buscar nuestra carpeta con el archivo CMakeLists.txt que hemos modificado y guardado en las dos primeras líneas de arriba de la pantalla que dicen: Dónde está el código fuente («*Where is the source code*») y Dónde construir los binarios («*Where to build the binaries*»). Posteriormente, hacemos clic en *Configure* y se nos abre otra ventana como esta:





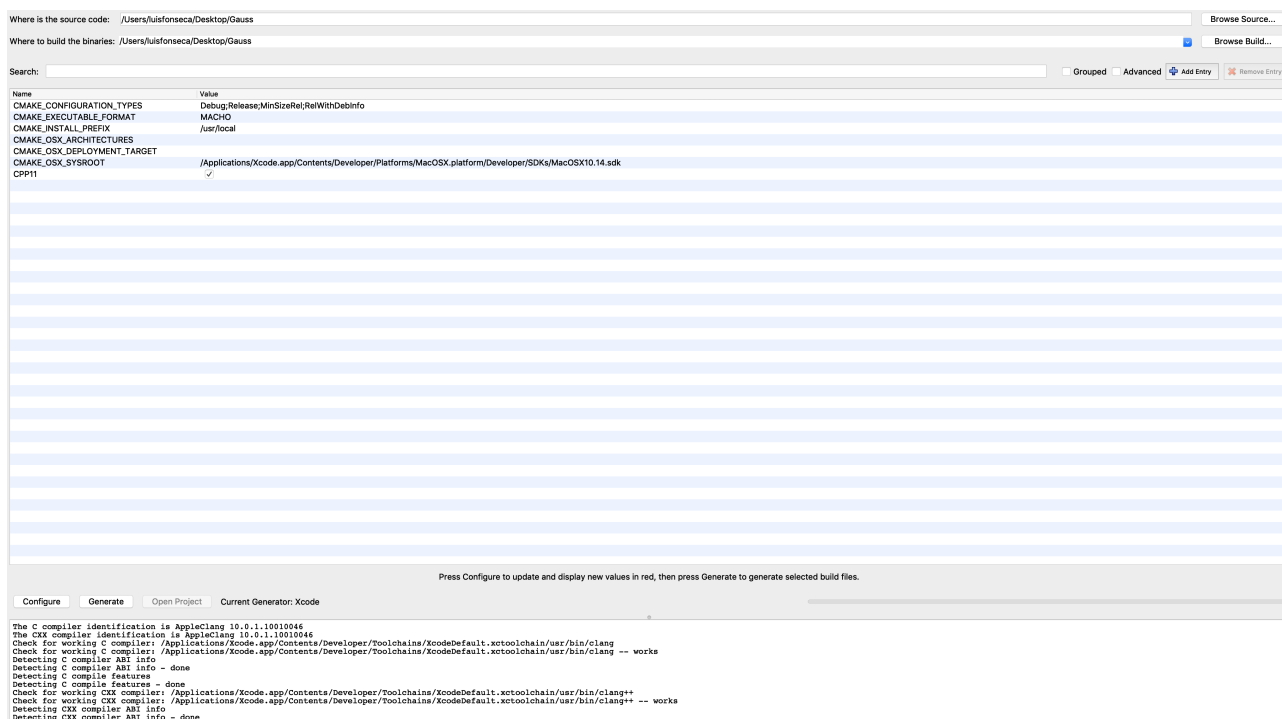
**Fig. 89.** Pantalla de definición del programa de destino en CMake.

Esa ventana que se abre nos pregunta qué programa es el destinatario del código que estamos introduciendo. Como podemos ver, el Xcode ya está seleccionado, con lo cual, lo único que debemos hacer es clic en *Done* y el programa empezará a compilar la información que está en el archivo que ha sido creado anteriormente. Si hay algún problema con lo que estaba escrito, en la pantalla del programa donde se indica *Name* y *Value* aparecerán líneas en rojo, y el problema será advertido concretamente en la ventana inferior:



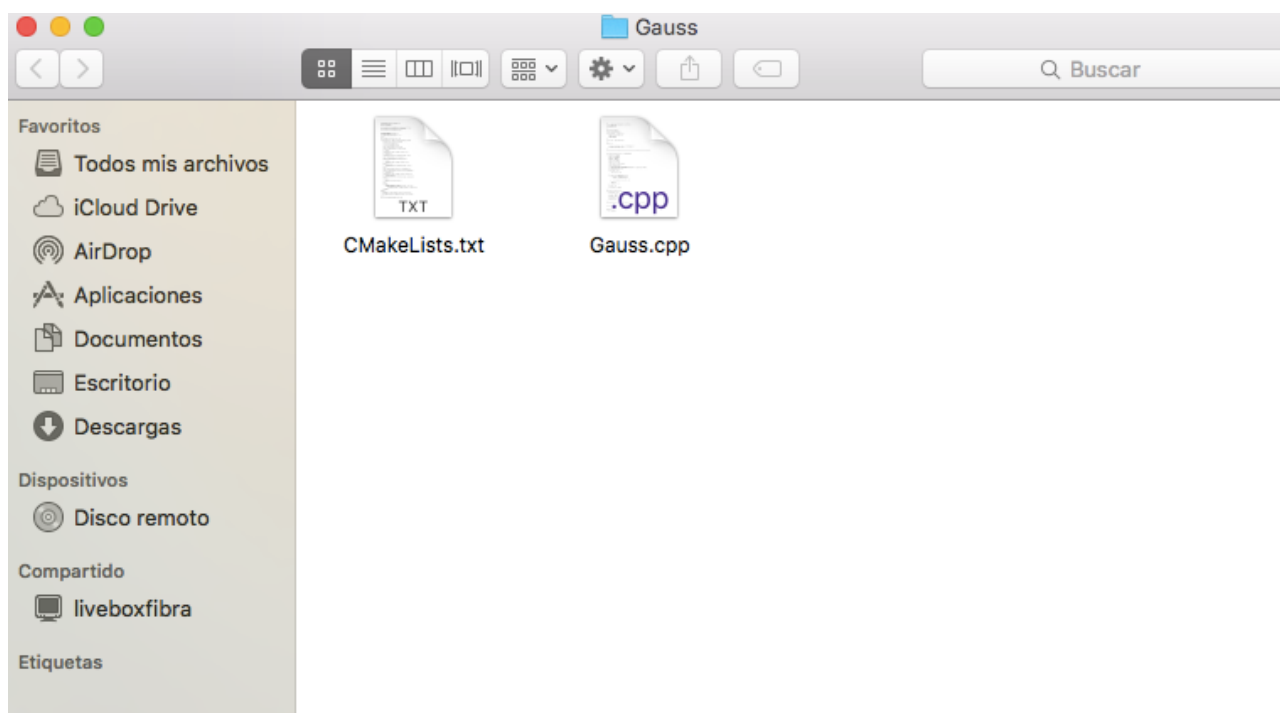
**Fig. 90.** Pantalla del programa Cmake indicando errores a corregir para compilar el archivo inicial.

Obviamente, cada error debe ser analizado individualmente, estos errores pueden haberse producido porque se nos olvidó poner los archivos .txt y .cpp juntos, o porque hay un espacio innecesario después del nombre del UGen que cambiamos, o algo así, errores con una sencilla solución. Al encontrar y corregir el error indicado por CMake, el programa se mostraría así:



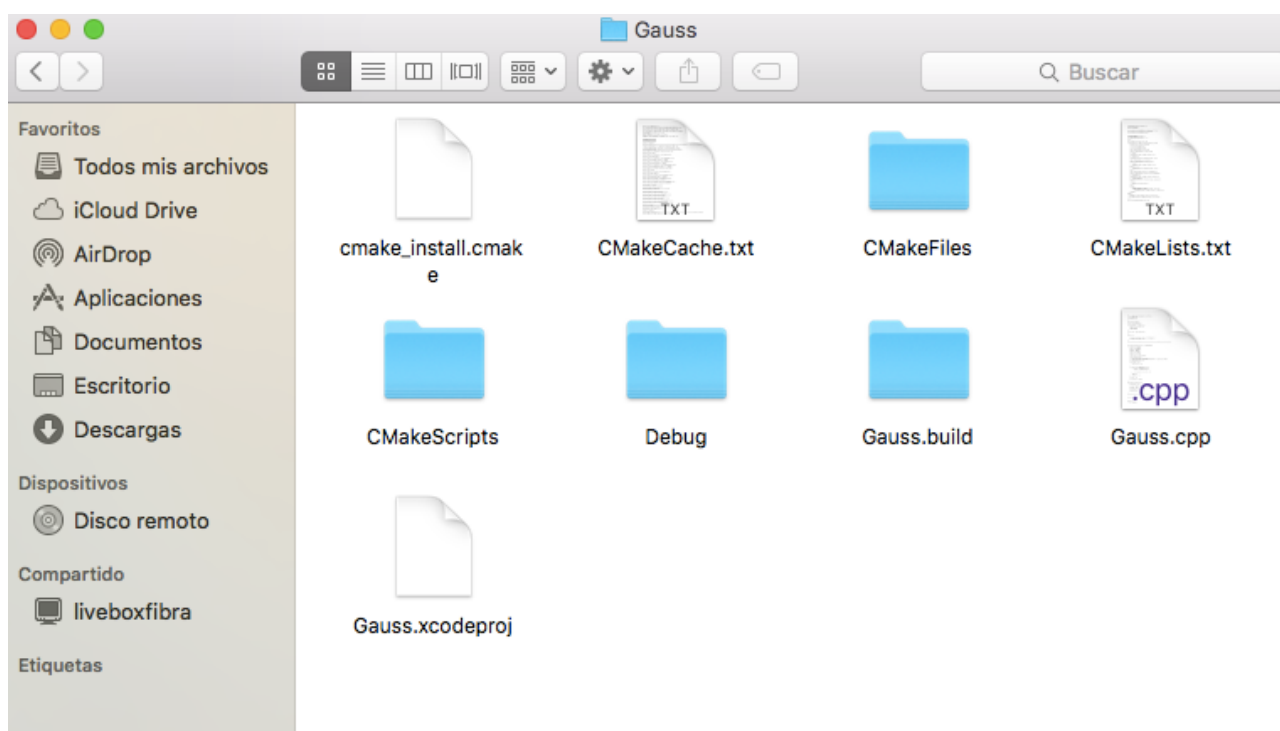
**Fig. 91.** Pantalla del programa CMake, sin errores en el texto y listo para compilación de los archivos del proyecto de Xcode.

Dada esta respuesta positiva del programa CMake, lo único que debemos hacer es clic en *Generate*. El programa indicará cuándo ha terminado el proceso. La carpeta en la cual iniciamos el proceso, contenía dos archivos:



**Fig. 92.** Carpeta que contiene los dos archivos modificados y ubicados conjuntamente.

Si miramos la misma carpeta ahora, vemos que hay varios archivos nuevos, que fueron generados por el CMake mientras compilaba el archivos CMakeLists.txt:



**Fig. 93.** Carpeta con todos los archivos generados por CMake.

Hemos completado el primer paso necesario para compilar nuestro UGen que será una onda formada por el algoritmo del mapa iterativo de Gauss. No hay necesidad de entender todos esos archivos que fueron creados, que en realidad son necesarios para el programa Xcode. El archivo que nos interesa y el que vamos a abrir en Xcode es el que vemos en la figura 94 llamado Gauss.xcodeproj. Pero antes de poder abrirlo, hay que tener el programa Xcode descargado en el ordenador, así como SuperCollider en código abierto, pasos que vamos a explicar enseguida.

Para compilar la onda Gauss que estamos desarrollando en C++ y utilizando el programa Xcode, se necesita tener acceso a bibliotecas de SuperCollider que solamente son asequibles con el programa en código abierto. Eso quiere decir que el programa debe estar descomprimido en todas sus carpetas y que el ordenador tenga un acceso visible a cada una de ellas y a sus archivos. Cuando descargamos SuperCollider desde su web<sup>21</sup>, el programa viene comprimido y muchos de sus archivos no son visibles. Se debe simplemente para que el programa funcione más rápido, visto que hay un número menor de archivos que acceder para el ordenador. Sin embargo, y por motivo de la idea inicial de SuperCollider de ser un *software* abierto, su versión en código abierto para desarrolladores también está disponible en GitHub<sup>22</sup> para descarga gratuita.

Si accedemos a su página y vamos bajándola, visto que es muy extensa, llegaremos a los links de descarga, como se puede visualizar abajo:

---

<sup>21</sup> <https://supercollider.github.io/download>. Visitado el 26/05/2020.

<sup>22</sup> <https://github.com/SuperCollider/SuperCollider/releases>. Visitado el 26/05/2020.

Releases · supercollider/supercollider · GitHub

Download » SuperCollider

Fixed an issue where copying a theme would crash the IDE if the new theme was not yet saved (#4146)

Fixed a number of deprecations in Qt (#4649)

Fixed a number of rendering warnings from SCDoc (#4265)

▼ Assets 7

SuperCollider-3.11.0-macOS-signed.zip	88.9 MB
SuperCollider-3.11.0-macOS.zip	86.8 MB
SuperCollider-3.11.0-Source.tar.bz2	17.3 MB
SuperCollider-3.11.0_Release-x64-VS-e341b49.exe	79.5 MB
SuperCollider-3.11.0_Release-x86-VS-e341b49.exe	63.3 MB
Source code (zip)	
Source code (tar.gz)	

Pre-release

Version-3.11.0-rc1

f5266e7

Verified

Compare

### 3.11 Release Candidate

Joshpar released this on 8 Mar

**New feature** - Ableton Link support. See *sclang*: *added*

Documentation improvements (#4759, #4732, #4744, #4697, #4326, #4673, #4610, #4515, #4389, #4355, #4333, #4222, #4198, #4144, #4123, #4148, #4140, #4080, #4078, #4057, #4016, #4027, #3925, #3953, #3954, #3912, #3929)

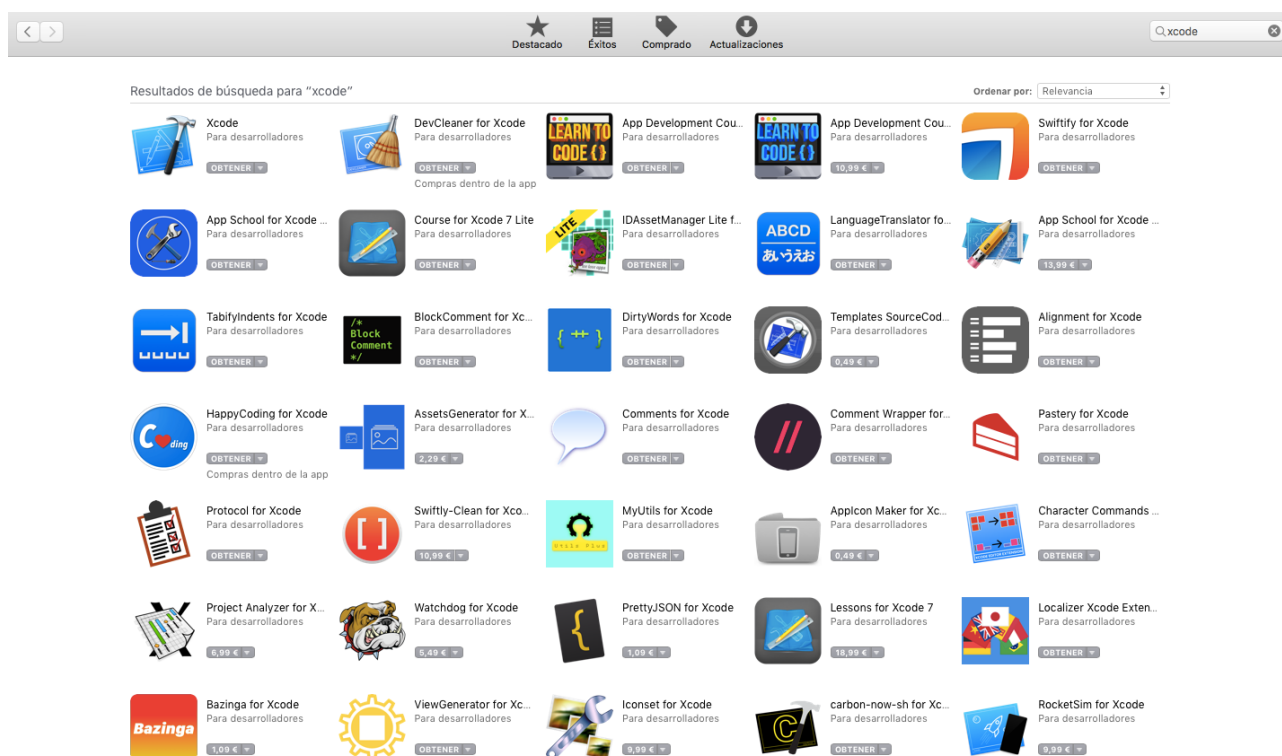
**General: Added**

Added NOVA\_SIMD build option for cookiecutter based plugin development (#4354)

**Fig. 94.** Página de descarga del programa SuperCollider en código abierto.

En la figura 94 podemos ver varios links de descarga. El que nos interesa es el tercero de la lista: SuperCollider 3.1.1.0-Source.tar.bz2. Al hacer clic, la descarga empieza automáticamente. Es un archivo comprimido en formato .tar. Si lo descomprimos, podemos ver la carpeta de SuperCollider y, si la abrimos observamos que contiene a su vez varias carpetas diferentes que abarcan todo el programa en código abierto. Esa carpeta general debemos trasladarla a /Users/"nombre de usuario"/supercollider, o sea, a partir del disco Macintosh HD que tenemos todos, clicar en Usuarios, se abre otra carpeta que indica el nombre de los usuarios con el icono de una casa, elegir tu usuario haciendo clic sobre su icono y justo después ubicar la carpeta, que debe llamarse SuperCollider, en esa subcarpeta de usuario. Es importante seguir estos pasos porque el CMake que hemos utilizado describe ese camino a Xcode, que buscará los *Headers* que son archivos de biblioteca de SuperCollider en C++ en esa subcarpeta exactamente.

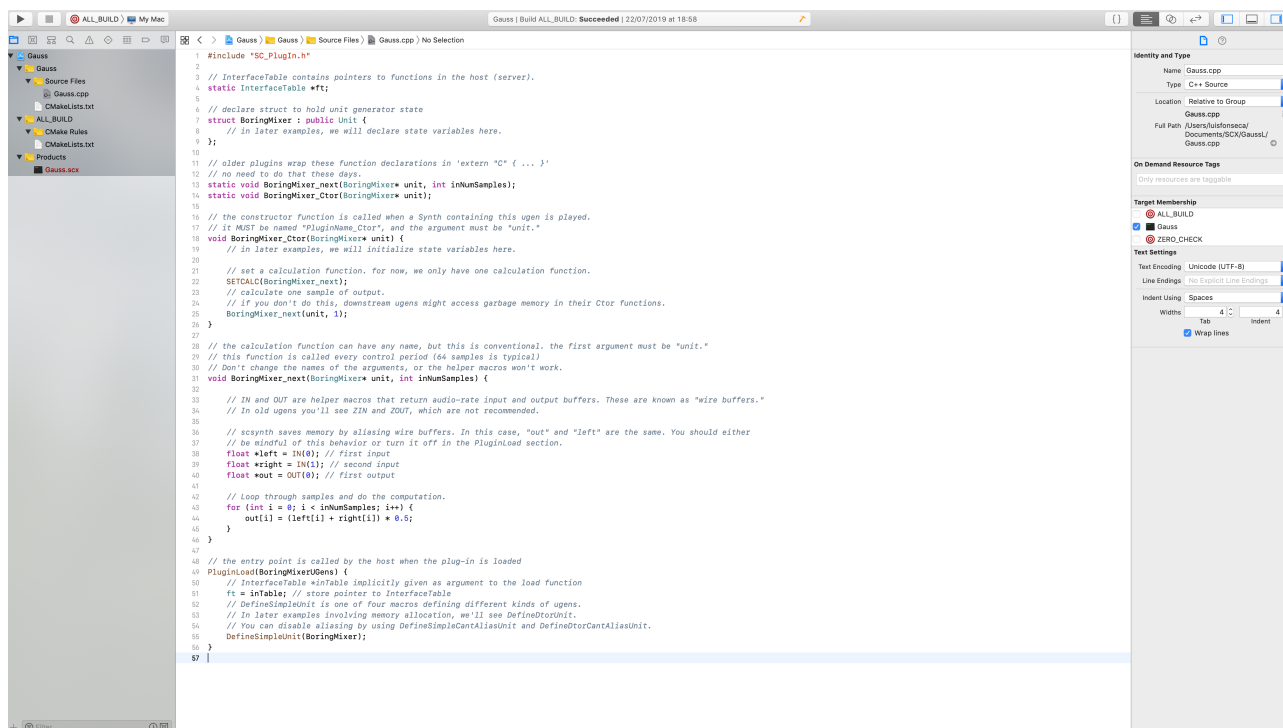
Hecho eso, es hora de descargar e instalar Xcode, que a su vez también es un programa de descarga libre para todos los usuarios de Mac, y lo encontramos en la *App Store* de nuestros ordenadores:



**Fig. 95.** La App Store de usuarios de Mac con el icono para descarga de Xcode.

Si ahora hacemos clic en ese icono de Xcode, el programa se descargará y se instalará. Terminamos así el segundo paso, que es establecer toda la estructura para la compilación de nuestra onda Gauss.

El próximo paso es la programación de la onda en Xcode, utilizando el lenguaje C++. Para ello, abrimos el archivo Gauss.xcodeproj que está en nuestra carpeta creada con el programa CMake como se puede ver en la figura 95. El programa Xcode se abre y podemos ver el código que hemos bajado, que en realidad es el ejemplo de BoringMixer que nos ofrece SuperCollider:



**Fig. 96.** El programa Xcode con el código C++ del ejemplo BoringMixer.

Para llegar a esta pantalla, debemos acceder a los iconos que se ven arriba a la derecha y hacer clic en Gauss > Source Files > Gauss.cpp (doble clic). Este es un punto de inflexión en el proyecto de construcción, dada la complejidad que podemos apreciar en el programa Xcode. Obviamente, en general los compositores y músicos, no somos especialistas en programación, la experimentación es necesaria, aunque, si trabajamos con SuperCollider, muchas semejanzas podremos apreciar entre esos dos lenguajes, y utilizar esa ventaja para poder entender y manipular códigos existentes para llegar a nuestro objetivo. Lo más interesante de SuperCollider como *software* abierto es que todo su contenido en general está disponible en GitHub para consulta y únicamente tenemos que encontrar un UGen existente que pueda tener como base una estructura que necesitamos, o sea, que genere ondas sonoras a través de cálculos matemáticos. Por suerte, SuperCollider contiene algo parecido que se llama ChaosUGens y que contiene algunos UGens con base matemática, que vamos a tener en cuenta para empezar nuestra onda Gauss. La onda Gauss, así como la Mandelbrot que también vamos a construir, está basada en un algoritmo unidimensional, como hemos visto en el apartado 1.6.1., con lo cual, buscaremos una referencia, dentro de todos los UGens que contiene el archivo ChaosUGens de SuperCollider, que se parezca a nuestro algoritmo.

A partir de ahora el trabajo es de experimentación con el lenguaje, buscando referencias de C++ y modificando los códigos existentes, desde el análisis más profundo de los códigos ya existentes y resolviendo errores hasta que se consigue compilar la

onda. Igualmente, hay que compilar múltiples veces la onda con una corrección del código si ese no funciona, hasta que encontremos lo que queremos y finalmente suene la onda en SuperCollider. Es importante averiguar posteriormente y con rigor científico, como hicimos al principio del apartado 2.2.1., que la onda que compilamos resulta ser la misma que proyectamos y si no es así, encontrar el error y volver a probar, hasta que teoría y resultado de experimentación coincidan perfectamente. Posteriormente, queda analizar esos resultados desde ángulos diferentes, como hicimos en el apartado 2.2.1. y volveremos a hacer en el apartado 3. El código final de la onda Gauss sería:

```
/*
1.   Gauss wave developed by Luis Fonseca
*/
2. #include "SC_PlugIn.h"
3. static InterfaceTable *ft;
4. struct NonLinear : public Unit {
5.   double x0, xn, a, b;
6.   float counter;
7.   //bool stable;
};
8. struct Gauss : public NonLinear {
};
9. extern "C" {
10.   void Gauss_next(Gauss *unit, int inNumSamples);
11.   void Gauss_Ctor(Gauss *unit);
};
////////////////////////////////////
12. void Gauss_next(Gauss *unit, int inNumSamples)
{
13.   float *out = ZOUT(0);
14.   float freq = ZIN0(0);
15.   double a = ZIN0(1);
16.   double b = ZIN0(2);
17.   double x0 = ZIN0(3);

18.   double xn = unit->xn;
```



```

19. float counter = unit->counter;
20. float samplesPerCycle;
21. if(freq < unit->mRate->mSampleRate)
22.     samplesPerCycle = unit->mRate->mSampleRate / sc_max(freq, 0.001f);
23. else samplesPerCycle = 1.f;
24. if(unit->x0 != x0){
25.     unit->x0 = xn = x0;
    }
26. for (int i=0; i<inNumSamples; ++i) {
27.     if(counter >= samplesPerCycle){
28.         counter -= samplesPerCycle;
29.         xn = exp (a * xn * xn) + b;
    }
30.     counter++;
31.     ZXP(out) = xn;
    }
32. unit->xn = xn;
33. unit->counter = counter;
}
34. void Gauss_Ctor(Gauss* unit)
{
35.     SETCALC(Gauss_next);
36.     unit->x0 = ZIN0(1);
37.     unit->xn = unit->x0;
38.     unit->counter = 0.f;
39.     Gauss_next(unit, 1);
}
////////////////////////////////////
40. PluginLoad(Gauss)
{
41.     ft = inTable;
42.     DefineSimpleUnit(Gauss);
}

```

No entraremos en más detalles en cuanto a la programación en lenguaje C++ se refiere, visto que se desviaría demasiado de la línea de investigación hacia la cual queremos seguir en esta tesis, pero los códigos pueden ser apreciados en las figuras abajo e igualmente consultados en el apéndice 5.1., subcarpeta 1 (Códigos C++).

Así que, el próximo paso es ubicar nuestra onda en la carpeta de *extensions* de SuperCollider y luego construir un archivo con extensión .sc que indica al programa qué parámetros pueden ser manipulados en la onda y deberán ser ubicados en la misma carpeta que el UGen. Igualmente, desarrollaremos un archivo de ayuda, como antes hemos comentado, para la información general del usuario y con algunos ejemplos para que se constate el correcto funcionamiento de la onda.

El cuarto y último paso será crear dos archivos de soporte a la onda y ubicarlos en su debida carpeta. La onda y el archivo de apoyo Gauss.sc que vamos a describir enseguida deben ser ubicados en la carpeta /Librería/Application Support/SuperCollider/Extensions. Esa es la carpeta que SuperCollider lee al abrirse y registra todos los archivos que están dentro de esa carpeta para su funcionamiento dentro del programa. Igualmente, si hay algún tipo de error en el archivo, SuperCollider nos lo hará saber nada más arrancar.

Para crear el archivo Gauss.sc lo único que debemos hacer es iniciar SuperCollider y abrir una ventana nueva. En esa misma ventana vamos a introducir el siguiente texto:

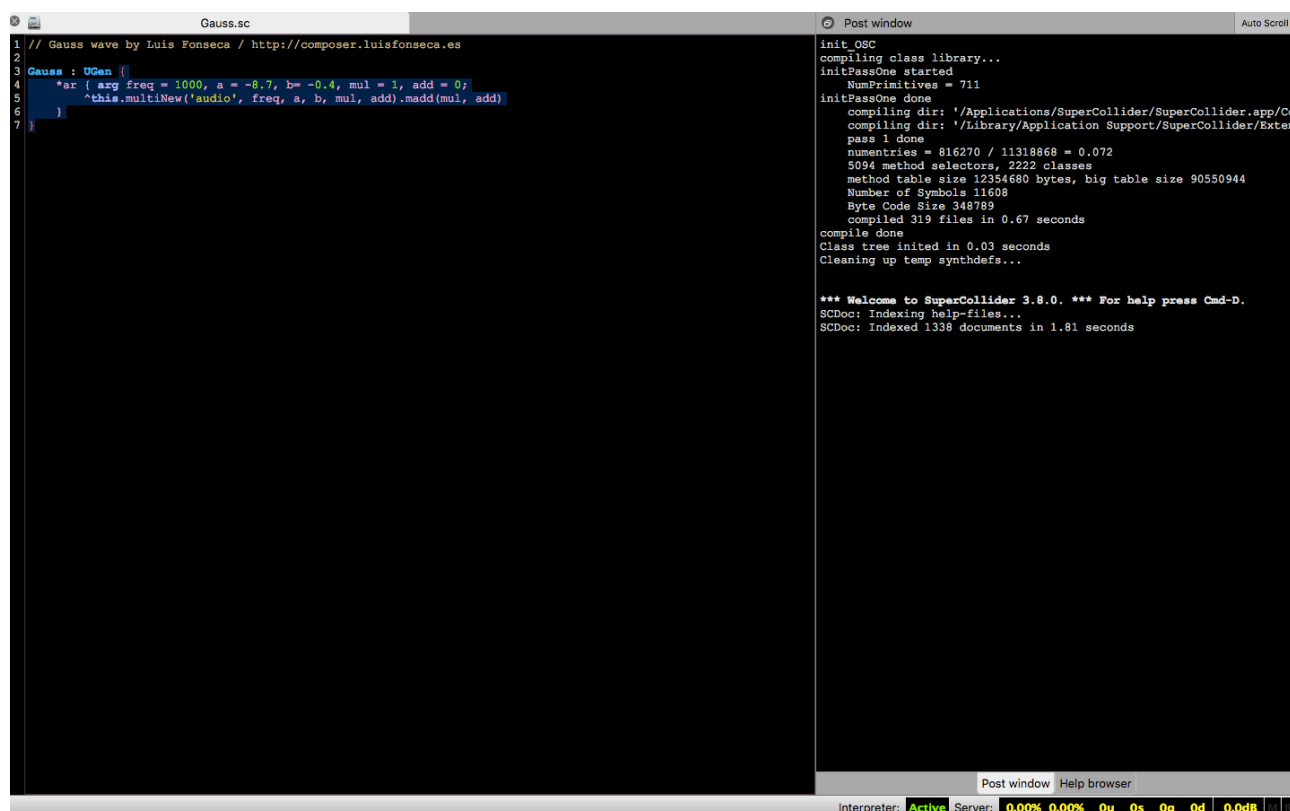
```
// Gauss wave by Luis Fonseca / http://composer.luisfonseca.es
Gauss : UGen {
  *ar { arg freq = 1000, a = -8.7, b= -0.4, mul = 1, add = 0;
    ^this.multiNew('audio', freq, a, b, mul, add).madd(mul, add)
  }
}
```

En SuperCollider, todo lo que está escrito después del símbolo // se considera como comentario y el programa no lo asimila como código, únicamente como información escrita. Así que empezamos firmando digitalmente el archivo que estamos programando. Como podemos apreciar, es un archivo sencillo, basado en el archivo ChaosUGens.sc y que indica algunos datos de la onda Gauss.scx a SuperCollider:

- ar: quiere decir que es un UGen acústico para el programa y no de control (kr). Así que cuando utilicemos la onda, tendrá que estar programada como Gauss.ar en SuperCollider.

- `arg`: argumentos, o sea, los mismos que hemos programado en el código C++ (frecuencia y los valores iniciales de las variables `a` y `b`), pero con valores iniciales preestablecidos, o sea, si escribimos en SuperCollider solamente `{Gauss.ar}.play`, los argumentos serían frecuencia a 1000 Hz, valores iniciales del algoritmo `a = -8.7` (tiene que ser negativo) y `b = -0.4`, `mul = 1`, `add = 0` (`mul` y `add` quieren decir multiplicar y adicionar a la onda y son parámetros preestablecidos por SuperCollider).

La última línea es estándar y establece la estructura de los parámetros cuando escribimos el código en SuperCollider: `Gauss.ar (freq, a, b, mul, add)` en ese orden. Después de escribir ese código, lo salvamos en la carpeta *extensions* como antes se ha indicado y le ponemos la extensión `.sc`.



**Fig. 97.** El software SuperCollider con el código *Gauss.sc*.

Si miramos la figura 97 con atención, podemos ver que la ventana derecha de SuperCollider acaba de compilar los UGens externos en la carpeta de *extensions* entre otras funciones iniciales y el código que hemos descrito anteriormente acaba de ser grabado como *Gauss.sc* en la misma carpeta.

La onda ya está lista para arrancar, pero con la intención de que esa onda pueda ser utilizada por otros usuarios en el futuro, complementaremos el trabajo con un archivo de ayuda con extensión .schelp.

Para crear ese archivo de ayuda, solamente necesitamos abrir SuperCollider y una nueva ventana dentro del programa. El texto del archivo está basado en otros archivos de ayuda que contienen el programa y lo introducimos en la ventana como tal:

class:: Gauss

summary:: Gaussian iterated-map chaotic generator

categories:: UGens>Generators>Chaotic

related:: Classes/GaussL

description::

A non-interpolated sound generator based on the difference equation

teletype::

$$x = (e ** (a * (x ** 2))) + b;$$

::

a values must always be negative.

Gauss wave developed by Luis Fonseca (<http://composer.luisfonseca.es>)

classmethods::

method:: ar

argument:: freq

Iteration frequency in Hertz

argument:: e

Initial euler's number (preseted)

argument:: a

Initial initial value of a (negative)

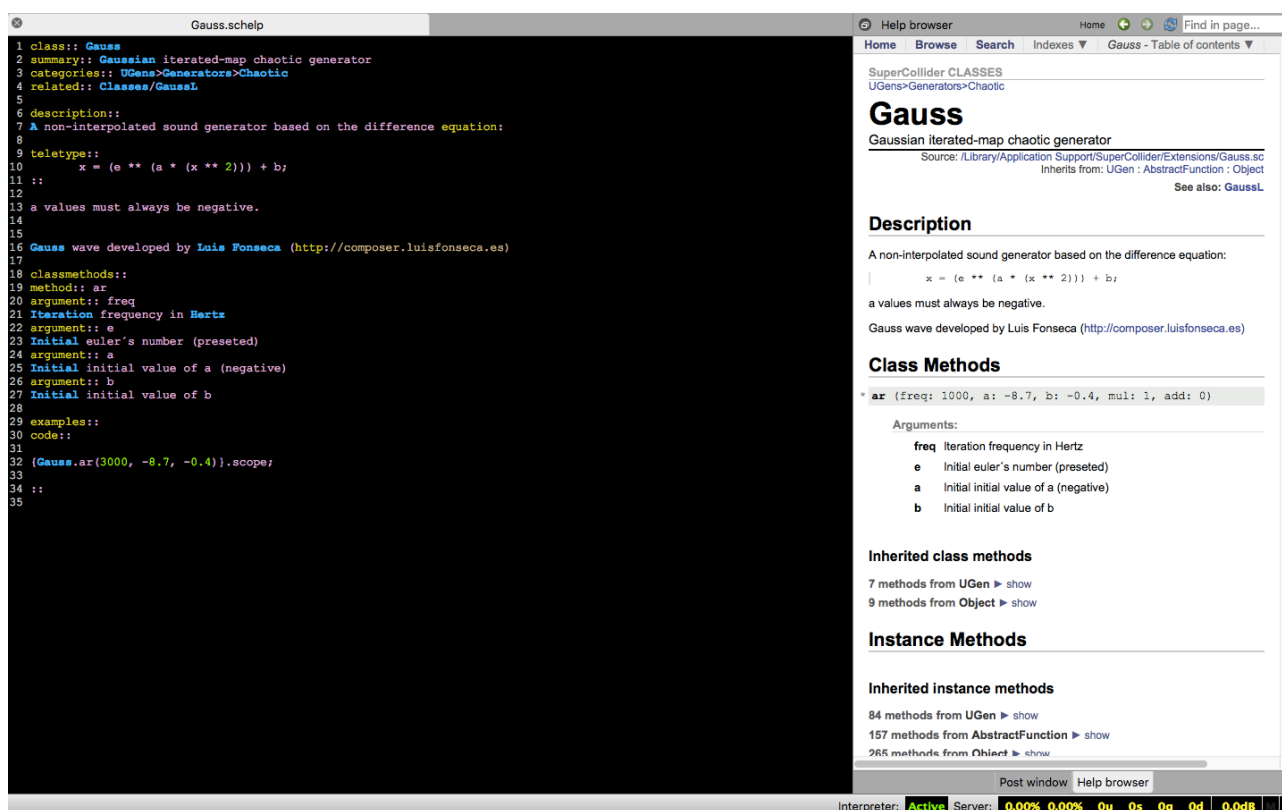
argument:: b

Initial initial value of b

examples::

code::

```
{Gauss.ar(3000, -8.7, -0.4)}.scope;
```



**Fig. 98.** Pantalla de SuperCollider con el archivo Gauss.schelp y la ventana de ayuda lateral.

En la figura 98 podemos ver mejor la relación del código con la ventana de ayuda que tiene SuperCollider. Vemos que las primeras líneas clasifican el UGen, su nombre se puede visualizar arriba, así como su categoría, ubicación y UGens con los cuales está relacionado (GaussL). Abajo se ve la descripción, que contiene el comentario de que la variable *a* tiene que ser siempre negativa, la ecuación que la genera, sus argumentos y todo lo que necesitamos saber de la onda. El archivo es bastante sencillo, aunque hay que definirlo tal cual para que SuperCollider lo interprete bien y pueda ser consultado en su lista interna de ayuda. Ese archivo se graba con la extensión *.schelp*, que es la que SuperCollider identifica para todos sus archivos de ayuda. Lo grabamos por lo tanto como Gauss.schelp y lo ubicamos junto a todos los demás archivos de ayuda del sistema, o sea, en la carpeta: /Applications/SuperCollider/SuperCollider.app/Contents/Resources/HelpSource/Classes.

Hemos finalizado por lo tanto el último paso y con ello nuestra onda tiene que funcionar. Tanto los UGens generados como los archivos de definición *.sc* y los archivos de ayuda están disponibles en el apéndice 5.1./2., UGens y Patrones SuperCollider, así como las muestras como ejemplo que hemos trabajado anteriormente, en el mismo apéndice 5.1./Ejemplos de sonidos generados por la investigación.

### 2.2.2. Teoría II

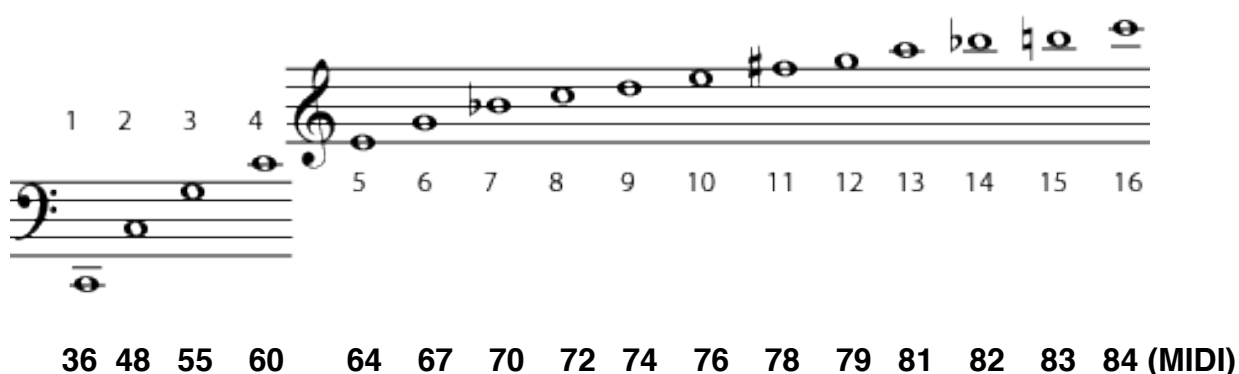
Como se ha expuesto en la teoría I, los intervalos de los armónicos son clasificados como consonantes o disonantes, y de acuerdo a la complejidad de la relación matemática de la frecuencia sonora de las notas que lo componen. Si los armónicos consonantes son los que respetan la secuencia aritmética de multiplicación por 1, 2, 3, 4 y hasta 16, los armónicos disonantes son los que no siguen exactamente esa relación matemática.

La teoría II está basada por lo tanto en la manipulación de armónicos, que parten de una disposición consonante de sus proporciones matemáticas (figura 99). Obviamente, esa manipulación de armónicos no puede existir en la acústica real, y solo puede ser concebida dentro de una simulación virtual, más bien desde la generación electrónica a partir de la síntesis no-estándar con un proyecto definido y experimentando con sus resultados inmediatos.

Hay una cantidad enorme de posibilidades dentro de esta experimentación, y seguramente todas tienen tendencia a un resultado tímbrico diferente. Para no extenderse demasiado en la experimentación, vale la pena tomar decisiones en el proyecto del sonido y posteriormente analizar y apreciar si hemos llegado a un resultado satisfactorio.

La construcción de estos sonidos pasará, por lo tanto, por tres ideas generales: la manipulación de armónicos según proporciones matemáticas generadas por las respuestas de diferentes algoritmos, la dinámica que aplicamos en esos armónicos y la duración del sonido, que tendrá dos alternativas: un sonido pulsado, percutido, y otro teñido, que obtendrán la manipulación de sus armónicos de maneras diferente para un mejor resultado.

Hagamos primero el proyecto del sonido, con sus 16 armónicos consonantes, como podemos apreciar en la figura 99:



**Fig. 99.** Secuencia natural de armónicos.

La mecánica para generar esos armónicos es sencillamente multiplicar la fundamental por 1, 2, 3, 4 ... hasta 16. Los valores que vemos debajo de la secuencia de armónicos de la figura 99 son valores MIDI, es decir, son valores preestablecidos para ordenadores que identifican las notas musicales y de acuerdo con su octava. Para que entendamos cómo funcionan y visto que van a ser claves en la construcción de nuestra teoría y proyecto, el valor midi para un C4 sería el 60. Un C#4 sería 61 y un B3, el 59. Es decir, que se suma o resta un valor igual a 1 a cada medio tono y como consecuencia, una octava son 12 valores por encima del designado. La figura 99 es un ejemplo con la nota fundamental C2 y su secuencia natural de armónicos.

Aquí podemos, por lo tanto, hacer la conexión para el proyecto de génesis de sonido entre armónicos y algoritmos. Si experimentamos en principio con la ecuación del conjunto de Mandelbrot, sabemos que sus cadenas de respuestas están entre el -2 y el 2, así que una de las mejores formas de relacionar estos resultados con el movimiento de los armónicos sería utilizando los valores midi asignados a cada nota.

De esa forma, podemos sumar o restar la respuesta del algoritmo a los armónicos, y de acuerdo con si es positiva o negativa, desplazar así los armónicos en un movimiento de máximo dos tonos más grave o más agudo. Eso puede incurrir en que algunos armónicos se crucen y cambien de orden, teniendo consecuencias tímbricas que pueden ser interesantes en esta experimentación, pero nunca que se escapen del rango audible de nuestros oídos.

La decisión ahora es qué armónicos mover. Podemos aplicar esa cadena de respuesta del algoritmo a todos los armónicos menos la fundamental, o parcialmente a algunos de ellos. Para equilibrar el sonido y mantener la fundamental más arropada en su frecuencia, hemos decidido mover la mitad de los armónicos como experimentación inicial, observar y analizar su comportamiento tímbrico. Por lo tanto, haremos la manipulación del armónico 9 hasta el 16.

Otra decisión importante que hay que tomar es la dinámica que van a tener esos armónicos. Hemos visto en la teoría I cómo la dinámica de esos armónicos en relación a la fundamental puede provocar diferencias en el timbre, por lo tanto, haremos dos experimentaciones diferentes en este sentido; en la primera aplicaremos una dinámica descendente y de forma lineal en la dinámica de los armónicos, o sea, la fundamental tiene su valor máximo y ese va disminuyendo linealmente hasta el armónico 16.

En la segunda idea en relación a la dinámica de los armónicos y sabedores de que en los sonidos acústicos esa curva no sería tan perfecta como la producida por un ordenador, e incluso para provocar diferencias no proporcionales dentro de las diferentes

dinámicas de los armónicos, aplicaremos la respuesta del algoritmo de Mandelbrot a la dinámica de los armónicos y otra vez, observar y analizar el resultado conseguido en la experimentación.

El próximo paso sería programar en SuperCollider la estructura del sonido. Para ello, desarrollaremos un código en forma de instrumento dentro del programa. El concepto de instrumento en SuperCollider es el mismo que en el ámbito real, o sea, una definición de sonido que debe ser programado y registrado en el programa, y luego puede ser tocado dentro de otros códigos como en patrones o rutinas, que nos interesan especialmente. Los códigos de instrumentos se llaman *SynthDef* y el de nuestro sonido es el siguiente:

1. (*// Modulación de armónicos por Luis Fonseca.*

2. *SynthDef*(motivo, *//nombre del instrumento.*

3. {*l freq, pan = 0, level = 1, h9 = 9, h10 = 10, h11 = 11, h12 = 12, h13 = 13, h14 = 14, h15 = 15, h16 = 16* | *// Aquí se definen las variables de frecuencia, panoramización, dinámica y los armónicos de 9 a 16 designados por la letra h.*

4. var amps, freqs, signal, envIndividual, envGlobal, trigger;

5. freqs = freq \* Array.series(8, 1, 1).reverse; *// Aquí se calculan los 8 primeros armónicos.*

6. freqs = freqs.add(freq\*h9).add(freq\*h10).add(freq\*h11).add(freq\*h12).add(freq\*h13).add(freq\*h14).add(freq\*h15).add(freq\*h16); *// Aquí se suman individualmente los 9 últimos armónicos, que serán los que sufran manipulación.*

7. amps = Array.geom(16, 0.6, 1.034); *// Aquí se asignan las dinámicas lineares*

8. trigger = Impulse.ar(0.00001);

9. signal = GrayNoise.ar(0.005); *// Aquí se define el ruido gris como base del sonido.*

10. envIndividual = EnvGen.ar(Env.perc(0.01, 0.1), trigger); *// Aquí se moldea la envolvente de percusión que percutirá el ruido gris y de él sacará solamente las frecuencias deseadas (los 16 armónicos).*

11. signal = signal \* envIndividual;

12. signal = Pan2.ar(

Klank.ar( *// Este es el filtro de sonido, que saca las frecuencias del ruido gris.*

[ freqs, amps, 2.5 ],



```

        signal
    ),
    pan
);
13. envGlobal = EnvGen.ar( // Esta es una envolvente global, para controlar la resonancia/
duración del sonido.
14.
        Env(
            [0,level,level,0],
            [0.01, 4, 0.01],
            \step, 3, 0
        ),
        doneAction: 2
    );

15.    Out.ar(0, signal*envGlobal)
    }
).add
)

```

Para que entendamos el código anterior, los textos en rojo son comentarios al código, para que podamos visualizar mejor cómo construimos el sonido y qué está pasando dentro del mismo código.

Sin embargo, explicaremos algunos detalles más específicamente. La línea 3 define las variables h9 a h16, que en un primer momento tienen valor del 9 al 16 y esos valores serán multiplicados por la frecuencia de la fundamental y se posicionarán, por lo tanto, como armónicos. Esos armónicos, por lo tanto, están escritos como variables que se pueden manipular desde el exterior del código, justamente para que podamos, en el próximo paso, hacerlo desde un código de rutina. Los otros ocho armónicos que no cambiarán en la futura manipulación son definidos en la línea 5. La línea 6 suma todos los armónicos y los ordena tal como deben ser y la línea 7 establece las dinámicas lineales. El comando *Array* se desarrolla en valores decrecientes, como podemos ver a continuación:

```

0,6, 0,6204, 0,6414936, 0,6633043824, 0,6858567314016, 0,70917586026925,
0,73328783951841, 0,75821962606203, 0,78399909334814, 0,81065506252198,

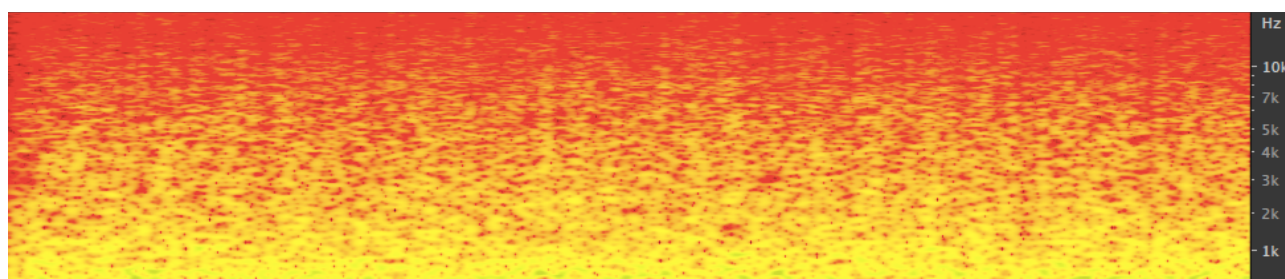
```

0,83821733464773, 0,86671672402575, 0,89618509264263, 0,92665538579248, 0,95816166890942, 0,99073916565234

Tenemos, por lo tanto, 16 valores que servirán de dinámica, desde el armónico más agudo hasta la fundamental. Establecida la proporción de las frecuencias que van a ser generadas y sus dinámicas, vale la pena entender cómo se crea el sonido. En la línea 9 podemos ver como base de la señal el UGen *Gray noise*, que es un ruido parecido al ruido blanco, que contiene todo el espectro de frecuencias, pero tiene un concepto generativo diferente, que produce tanto una forma de onda diferente, como el espectro correspondiente:



**Fig. 100.** Forma de onda del ruido gris.



**Fig. 101.** Análisis espectral del ruido gris.

Como podemos observar, la forma de onda del ruido gris es bastante diferente de la del ruido blanco (figura 67), con picos mucho más extremos hacia la zona aguda y la zona grave, lo que genera armónicos intermitentes y más concentrados en la zona grave, como podemos ver en la figura 101. Esa intermitencia se percibe en el sonido cuando lo filtramos, creando una inestabilidad en la dinámica del sonido que vamos a filtrar, dando mucha más vida al sonido del que haría el ruido blanco. De ahí la decisión de utilizar este ruido como base de nuestro proyecto de sonido.

En la línea 10 del código anterior, podemos ver la envolvente de sonido, de carácter percutivo. La envolvente es fundamental para la articulación que deseamos, visto

que es la que da forma al sonido. Como podemos observar, los valores que contiene, 0,01 es el tiempo de ataque de la nota, o sea, muy rápido, que crea un impacto en el inicio de la misma; y el valor 0,1, que es el tiempo de duración de ese ataque. La resonancia de la nota será hecha con una envolvente global, para que esta tenga una sonoridad más natural.

En la línea 12 y a través del UGen *Klank* es donde vamos a filtrar el ruido gris. Entendemos por filtrar un ruido, la acción de impactar nuestra envolvente al ruido gris, dejar que se escuche de este solamente las frecuencias que nos interesan, o sea, nuestra fundamental con sus consecutivos 15 armónicos, con sus respectivas dinámicas. A partir de ahí, metemos el sonido en una envolvente global (línea 14) y le damos una duración de resonancia de cuatro segundos. La estructura del sonido está lista, ahora queda construir una rutina para que podamos escuchar y manipular ese instrumento programado.

Antes de eso, construyamos un código parecido al anterior, pero cambiando la envolvente para que el sonido sea teñido en lugar de percutido:

```
(
1. SynthDef(\motivo2,
2.   {l freq, metro, pan = 0, level = 1, h9 = 9, h10 = 10, h11 = 11, h12 = 12, h13 = 13,
   h14 = 14, h15 = 15, h16 = 16, transitionTime1 = 3, sustainTime = 3, transitionTime2 = 3 |
3.     var amps, freqs, signal, env;
4.     freqs = freq * Array.series(8, 1, 1).reverse;
5.     freqs = freqs.add(freq*h9).add(freq*h10).add(freq*h11).add(freq*h12).add
   (freq*h13).add(freq*h14).add(freq*h15).add(freq*h16);
6.     amps = Array.geom(16, 0.6, 1.034);
7.     signal = GrayNoise.ar(0.01);
8.     signal = Pan2.ar(
9.       Klank.ar(
           `[ freqs, amps, 1 ],
           signal
         ),
         pan
       );
10.    env = EnvGen.ar(
           Env(
```

```

                                [0,0.5,0.5,0],
                                [transitionTime1, sustainTime, transitionTime2],
                                \sine
                                ),
                                doneAction: 2
                                );

                                Out.ar(0, signal*env)
                                }
                                ).add
                                )

```

Si comparamos este código (motivo2) con el anterior (motivo), podemos ver que básicamente es igual, pero desaparece la envolvente percutida y cambiamos la envolvente global introduciendo variables de transición que nos servirán para cambiar los armónicos del sonido teñido de manera suave y con un tiempo determinado para ello.

### 2.2.2.1. Patrones

Antes de desarrollar un código para escuchar el instrumento que acabamos de construir, es necesario establecer códigos de patrones en SuperCollider. Esos patrones estarán programados para calcular la respuesta de nuestros algoritmos rápidamente para que el programa reciba sus valores y pueda utilizarlos en el cálculo del cambio de armónicos, así como en otros objetos que vamos a desarrollar más adelante. Crearemos, por lo tanto, dos patrones diferentes, uno con la ecuación de Mandelbrot, que se llamará Pmandel y el otro con la ecuación del mapa iterativo de Gauss, que se llamará PGaussMap. Para construir esos patrones, seguiremos los pasos explicados en el tutorial de SuperCollider<sup>23</sup> y abriremos una ventana en el programa donde introduciremos el código a seguir:

1. Pmandel : Pattern {
2.   var <z, <c, <length;
3.   \*new { arg z=0, c=1, length=inf;
4.    ^super.newCopyArgs(z, c, length)

<sup>23</sup> [http://doc.sccode.org/Tutorials/A-Practical-Guide/PG\\_Ref01\\_Pattern\\_Internals.html](http://doc.sccode.org/Tutorials/A-Practical-Guide/PG_Ref01_Pattern_Internals.html).

```

    }
5.  storeArgs { ^[z,c,length] }
6.  embedInStream { arg inval;
7.    var zStr = z.asStream;
8.    var cStr = c.asStream;
9.    var zVal, cVal;
10.   length.value.do({
11.     cVal = cStr.next(inval);
12.     zVal = zStr.next(inval);
13.     if(cVal.isNil or: { zVal.isNil }) { ^inval };
14.     inval = (z = (z ** 2)+ c) .yield;
    });
    ^inval;
  }
}

```

En general, y en líneas rápidas para que entendamos el código anterior, definimos en la línea 3 las variables de la ecuación de Mandelbrot y la definimos como un *stream*, que se podría traducir como cadena, que es exactamente lo que necesitamos; una cadena de respuesta muy rápida y larga de nuestro algoritmo. En la línea 14 podemos ver la definición del mismo algoritmo, en el lenguaje de SuperCollider.

Grabamos ese código con extensión .sc y lo ubicamos en la carpeta de *extensions*, la misma en la que hemos ubicado nuestras ondas Mandelbrot y Gauss.

Este mismo proceso se llevó a cabo con el algoritmo del mapa iterativo de Gauss y los dos patrones están grabados en el apéndice 5.1., en la subcarpeta 2 (UGens y patrones de SuperCollider) y pueden ser consultados y utilizados aparte de esta investigación.

### 2.2.2.2. Rutinas

Construidos nuestros patrones, ubicados correctamente y compilados por SuperCollider al arrancar, estamos listos para construir nuestras rutinas dentro del programa, lo cual nos dará múltiples posibilidades de escuchar, analizar y utilizar esos sonidos como mejor nos convenga.

El código de rutina que desarrollamos para el instrumento motivo, o sea, para nuestro sonido con articulación pulsada es el siguiente:

( // Esta es la rutina que hace funcionar el instrumento motivo. Cada vez que se repite demanda nuevos valores del algoritmo de Mandelbrot y los aplica en el instrumento "motivo".

1. var stream;

2. stream = Pmandel(0, -1.95).asStream; //Esta es la cadena de resultados de la ecuación de Mandelbrot. Podemos cambiar el valor entre paréntesis (valor inicial de la ecuación) para obtener diferentes resultados.

3. Routine({

4.                   inf.do({

5.                   b = stream.nextN(8);

6.                   Synth(\motivo, [ // Aquí es donde el loop asigna los resultados de la ecuación y los envía al instrumento motivo.

7.                   \freq, (80), // Esta es la frecuencia del sonido, o sea, la nota fundamental.

8.                   \h9, (9 + b[0]),

9.                   \h10, (10 + b[1]),

10.                  \h11, (11 + b[2]),

11.                  \h12, (12 + b[3]),

12.                  \h13, (13 + b[4]),

13.                  \h14, (14 + b[5]),

14.                  \h15, (15 + b[6]),

15.                  \h16, (16 + b[7]),

]);

16.                  (3).wait; // El tiempo de espera para que vuelva a repetir el loop.

})

}).play

)

Se observa que el código está comentado (en rojo), pero lo explicaremos un poco mejor igualmente. Una rutina (*routine*) en SuperCollider es un loop, que se repetirá tantas veces queramos y en el espacio de tiempo que indiquemos. Eso quiere decir que todo el código se repetirá, pudiendo haber cambios en cada repetición o no. Miremos el código

desde el principio; en la línea 1 se declara la variable *stream*, que es una variable externa a la rutina. Eso quiere decir que la puedes consultar, pero no cambiar una vez que la rutina empieza. En la línea 2 definimos nuestra variable *stream* con nuestro recién hecho patrón de Mandelbrot (Pmandel) y la definimos como cadena (.stream al final), así es como le otorgamos un valor de inicio de -1,95, valor extremadamente caótico en el algoritmo de Mandelbrot y con la intención de obtener como resultado un cambio constante e indefinido de armónicos.

En la línea 3 empieza la rutina, así que en la línea 4 la definimos como una rutina infinita (inf.do) que significa que seguirá generando sonidos hasta que la paremos nosotros. Si queremos, por ejemplo, únicamente tres pulsos del sonido, podemos cambiar ese comando para 3.do y la rutina se finalizará después de repetirse tres veces.

La línea 5 define una variable interna muy importante, que es la variable b. En esa línea pedimos a SuperCollider que consulte los siguientes ocho valores de nuestra cadena *stream*. Si estamos empezando la rutina, serán los primeros ocho valores, si no los valores siguientes al último consultado.

La línea 6 invoca el instrumento motivo, que tiene que estar reconocido por SuperCollider, eso quiere decir que hay que ir al código y presionar CMD+Enter, para que SuperCollider lo compile en su memoria.

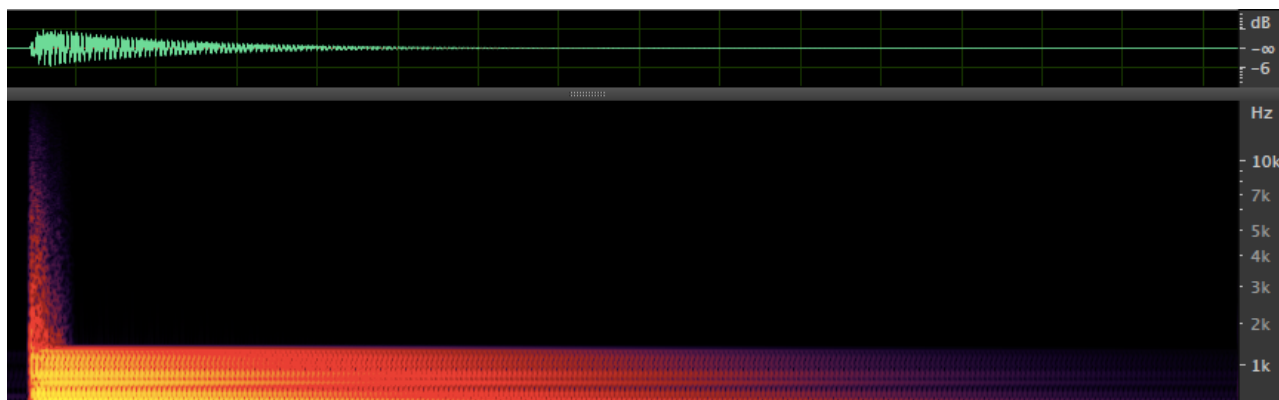
La línea 7 define la frecuencia de la fundamental. Acordemos que todos los armónicos son generados por multiplicaciones de 1 al 16 desde la frecuencia fundamental.

Las líneas 8 a 15 contienen nuestros armónicos de h9 a h16 como definidos en el instrumento motivo. Podemos ver cómo dentro de los paréntesis existen los valores de 9 a 16, que son los valores de la orden consonante de los armónicos como antes comentamos y, a esos valores se suman los valores b numerados entre corchetes del 0 al 7. Eso quiere decir que el primer valor de la ecuación de Mandelbrot se suma al armónico 9, el segundo valor al armónico 10 y así sucesivamente hasta el armónico 16. Si el valor que resulta de la cadena de Mandelbrot es positivo, entonces habrá una suma y ese armónico se desplazará hacia arriba (más agudo) y si el valor de Mandelbrot es negativo, ese armónico se desplazará hacia abajo (más grave).

La línea 16 es el tiempo de espera en segundos (3) para que se vuelva a repetir todo, cambiando los valores de la cadena de Mandelbrot.

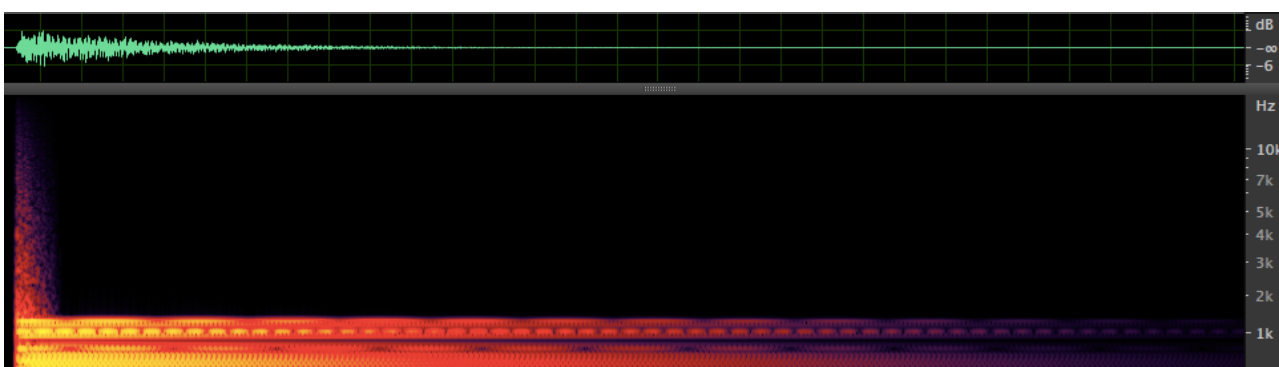
Llegados a este punto, vale la pena escuchar y analizar el sonido producto de esta teoría II y averiguar si hemos conseguido un resultado satisfactorio. Para ello, hagamos una comparación de esas pulsaciones que genera todo ese código, todas con valores de

frecuencia iguales (80 Hz), una vez sin modular los armónicos, o sea, con los 16 armónicos consonantes como tal, y la segunda vez con modulación de armónicos y comparemos sus espectros:



**Fig. 102.** Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II.

Este primer sonido está grabado en el apéndice 5.1., subcarpeta 6 (Ejemplos) y con número de archivo 9. Podemos observar cómo la forma de onda es de una pulsación perfecta, con ataque rápido y pérdida proporcional de sonido a lo largo del tiempo. Si observamos su espectro, podemos ver cómo los armónicos más agudos están presentes al principio, pero desaparecen rápido y los más graves quedan más tiempo y desaparecen igualmente uno antes que el otro, quedando la fundamental en último lugar. Eso sucede por las dinámicas lineales que hemos definido anteriormente, teniendo como resultado ese comportamiento de los armónicos. Comparemos ahora esos resultados con la modulación de armónicos:



**Fig. 103.** Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos.

Este es el primer pulso que contiene el archivo número 10 que se encuentra en la subcarpeta 6 (Ejemplos) del apéndice 5.1. Comparemos la diferencia tanto de la onda sonora como de su espectro con la figura 103. Podemos ver claramente cómo el



comportamiento de las dinámicas es exactamente el mismo, pero que hay un cambio visible (y audible) en el orden de los armónicos, donde podemos observar la presencia de espacio negro (sin sonido) del espectro, que significa que los armónicos cambiaron de sitio en relación al sonido anterior y es patente también cierta fase ocasionada por frecuencias muy cercanas que crean ondulaciones en la dinámica. La forma de onda tampoco es tan perfecta como la anterior, sufriendo ciertas irregularidades en su decaída sonora a lo largo del tiempo.

Podemos concretar una breve conclusión después de escuchar y analizar esta primera muestra de sonido generado por nuestra teoría II, dando por satisfactorio todo el proceso de manipulación de ocho armónicos, así como el resultado sonoro que parece haber logrado un timbre utilizable musicalmente.

Sigamos por lo tanto, con la misma idea, que parece lograr buenos resultados y construyamos una rutina para escuchar nuestro sonido, ahora en una articulación teñida:

```
(
1. var stream;
2. stream = Pmandel(0, -1.7).asStream;
3. Routine({
4.   var transitionTime1, sustainTime, transitionTime2;
      transitionTime1;
5.   inf.do({
6.     sustainTime = rrand(2.0,2.5);
7.     transitionTime2 = rrand(0.5,1.0);
8.     transitionTime1 = rrand(0.5,1.0);
9.     b = stream.nextN(8);
10.    Synth(\motivo2, [
11.      \freq, (59.midicps),
12.      \h9, (9 + b[0]),
13.      \h10, (10 + b[1]),
14.      \h11, (11 + b[2]),
15.      \h12, (12 + b[3]),
16.      \h13, (13 + b[4]),
17.      \h14, (14 + b[5]),
18.      \h15, (15 + b[6]),
19.      \h16, (16 + b[7]),
```

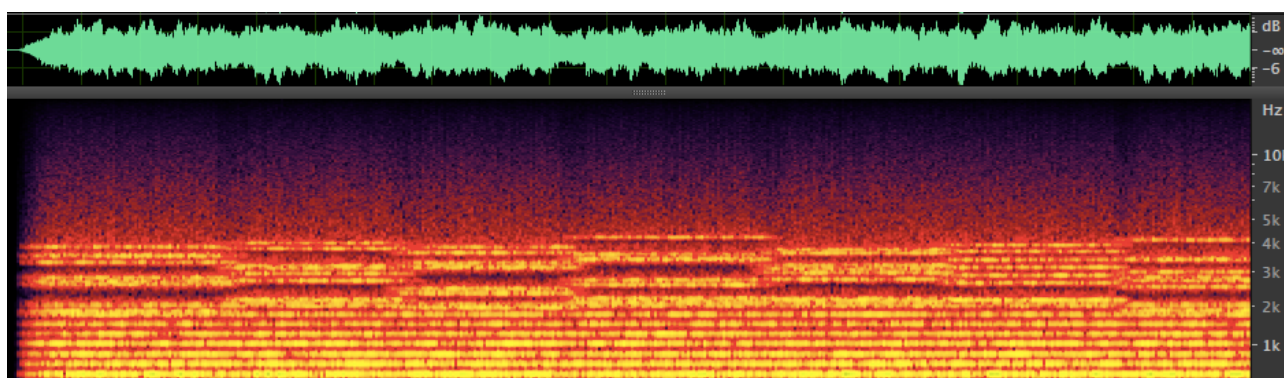
```

20.          \transitionTime1, transitionTime1,
21.          \sustainTime, sustainTime,
22.          \transitionTime2, transitionTime1
              ];
23.  [transitionTime1, sustainTime, transitionTime2].round(0.1).postln;
          (transitionTime1 + sustainTime).wait;
          transitionTime1 = transitionTime2;
          })
        }).play
    )

```

Podemos ver que la rutina arriba descrita es bastante parecida a la anterior y funciona exactamente igual, así que nos centremos en explicar lo que es diferente. Al ser una onda teñida, para que se escuchen los cambios de armónico suavemente, tenemos que hacer una transición en tiempo entre los armónicos que están sonando y los que vienen. Para eso creamos las variables de transición de las líneas 6 a 8, que definen un espacio de tiempo aleatorio (rrand) entre 2 y 2,5 segundos de tiempo sonando y 0,5 a 1 segundo de tiempo de transición. Esos valores son transportados al instrumento en las líneas 20 a 22 y la línea 23 sustituye el tiempo de reinicio de la rutina por el valor actual del tiempo de transición.

El ejemplo que vamos a analizar es el que se encuentra en el apéndice 5.1., subcarpeta 6 (Ejemplos) y archivo sonoro número 17:



**Fig. 104.** Forma de onda y análisis espectral de un sonido teñido generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos.

Aunque en este ejemplo la forma de onda tiene variaciones muy apreciables a simple vista, vale la pena saber que esas variaciones se generan en la manipulación de armónicos y no desde la forma de onda como en la teoría I. Dicho eso, es altamente

interesante el espectro que se genera desde el análisis de ese sonido, donde se puede comprobar el resultado de muchas teorías que veníamos aplicando en la construcción de este sonido; se puede confirmar cómo los primeros ocho armónicos son constantes en su frecuencia; cómo los ocho armónicos se mueven claramente a cada dos o tres segundos, cómo se contraen y expanden en el sonido. También se puede comprobar una intermitencia en todos los parciales, derivada del ruido gris que es base de la filtración de todo el espectro que analizamos. Podemos incluso ver claramente las zonas de transición entre los cambios de armónicos. Hay, sin embargo, una especie de nube de espectro en la zona más aguda, que es probablemente una resonancia que el sonido gana naturalmente al generar sus propios armónicos internos, dando al sonido algo más de carácter natural.

Creo que tanto la sonoridad, como el análisis que acabamos de hacer nos pueden dar un grado alto de satisfacción y demostración de esta teoría. La idea y técnica de construcción del sonido funcionaron como se había planeado, sin embargo, queremos llevar esta idea a otra dimensión de experimentación más, que es la aplicación de dinámicas con proporciones matemáticas asociadas a nuestros algoritmos.

Para ello, desarrollaremos nuestro instrumento un poco más e introduciremos variables para poder manipular esas dinámicas:

(// Modulación de armónicos con dinámicas

1. SynthDef(\motivoDinamics,
2.     {f freq, pan = 0, level = 1, h9 = 9, h10 = 10, h11 = 11, h12 = 12, h13 = 13, h14 = 14, h15 = 15, h16 = 16, d4=1, d5=1, d6=1, d7=1, d8=1, d9=1, d10=1, d11=1, d12=1, d13=1, d14=1, d15=1, d16=1 | // Aquí se añaden las variables de dinámica, representadas por la letra d y numeradas de 4 a 16.
3.         var amps, freqs, signal, envIndividual, envGlobal, trigger;
4.         freqs = freq \* Array.series(8, 1, 1).reverse;
5.         freqs = freqs.add(freq\*h9).add(freq\*h10).add(freq\*h11).add(freq\*h12).add(freq\*h13).add(freq\*h14).add(freq\*h15).add(freq\*h16);
6.         amps = Array.geom(16, 0.6, 1.034)\* [1, 1, 1, d4, d5, d6, d7, d8, d9, d10, d11, d12, d13, d14, d15, d16];
7.         trigger = Impulse.ar(0.00001);
8.         signal = GrayNoise.ar(0.005);
9.         envIndividual = EnvGen.ar(Env.perc(0.01, 0.1), trigger);

```

10.      signal = signal * envIndividual;
11.      signal = Pan2.ar(
            klank.ar(
                `[ freqs, amps, 2.5 ],
                signal
            ),
            pan
        );
12. envGlobal = EnvGen.ar(
            Env(
                [0,level,level,0],
                [0.01, 4, 0.01],
                \step, 3, 0
            ),
            doneAction: 2
        );
        Out.ar(0, signal*envGlobal)
    }
).add
)

```

El código, como podemos ver, está desarrollado a partir del código de sonido pulsado que fue expuesto anteriormente, pero le añadimos variables para las dinámicas de los armónicos, que es lo que queremos modular aparte de la frecuencia de los mismos. Hemos decidido aplicar las proporciones matemáticas a partir del armónico número 4, y para ello, se han creado las variables de d4 a d16. Para que esas variables tengan efecto en el sonido, las multiplicamos por las dinámicas lineales ya existentes, manteniendo las tres primeras intactas, como podemos ver en la línea 6. Mantenemos todo el resto de la estructura y empezamos a desarrollar la rutina para que podamos trabajar con ese nuevo instrumento:

```

(
1. var stream;
2. stream = Pmandel(0, -1.95).asStream;
3. Routine({

```

```

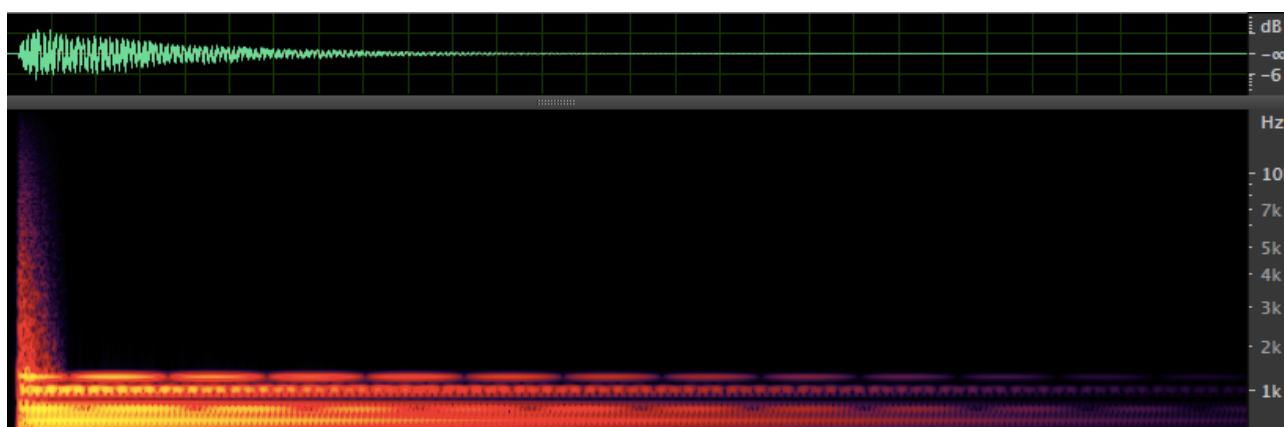
4.          inf.do({
5.      b = stream.nextN(8);
6.      c = stream.nextN(12).abs; // si se quita el argumento .abs aquí, algunos
armónicos desaparecen y obtenemos otros timbres diferentes y más opacos.
7.      Synth(\motivoDinamics, [
8.          \freq, (80),
9.          \h9, (9 + b[0]),
10.         \h10, (10 + b[1]),
11.         \h11, (11 + b[2]),
12.         \h12, (12 + b[3]),
13.         \h13, (13 + b[4]),
14.         \h14, (14 + b[5]),
15.         \h15, (15 + b[6]),
16.         \h16, (16 + b[7]),
17.         \d4, (c[0]),
18.         \d5, (c[1]),
19.         \d6, (c[2]),
20.         \d7, (c[3]),
21.         \d8, (c[4]),
22.         \d9, (c[5]),
23.         \d10, (c[6]),
24.         \d11, (c[7]),
25.         \d12, (c[8]),
26.         \d13, (c[9]),
27.         \d14, (c[10]),
28.         \d15, (c[11]),
29.         \d16, (c[12]),
           ]);
30.      3.wait;
           })
       }).play
    )

```

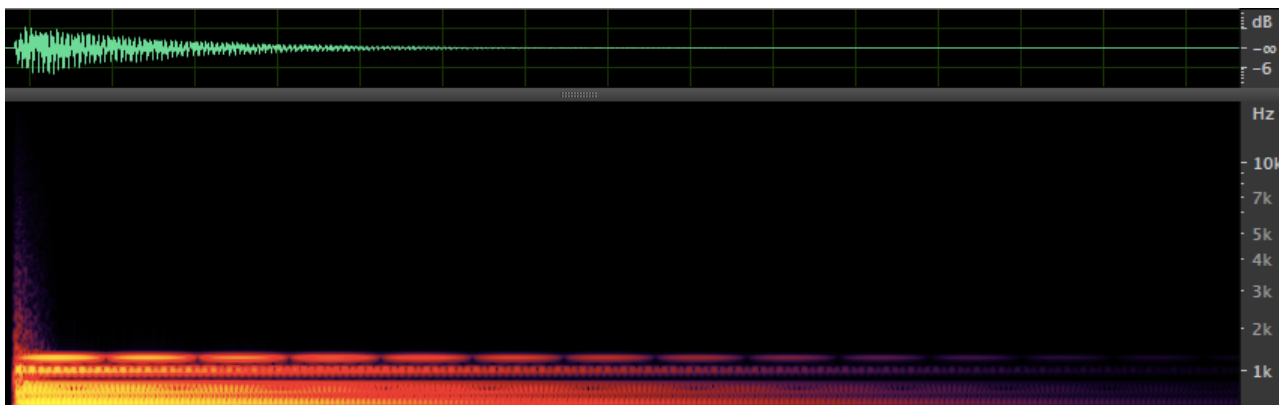
El código de esta rutina tiene exactamente la misma estructura que la rutina de sonido pulsado que utilizamos anteriormente, pero simplemente se añaden las variables

de dinámica (d4 a d16) que hemos agregado antes y, en lugar de multiplicarla por el valor existente, sencillamente cambiamos ese valor para el valor que nos responde la cadena de Mandelbrot. Hay, sin embargo, un matiz especial aquí, que es el que detallamos en la línea 6: cuando pedimos a SuperCollider que nos devuelva los valores de la cadena de Mandelbrot establecida anteriormente, le podemos añadir o quitar la extensión .abs, que quiere decir valores absolutos. Como la ecuación de Mandelbrot nos devuelve valores positivos y negativos, le podemos pedir en esa línea que esos valores sean solamente positivos. Eso tiene un efecto determinante en el timbre, visto que las dinámicas de los armónicos pueden ganar amplitud o perderla, pero siempre serán positivas, o sea, siempre sonarán más o menos fuerte. Si quitamos la extensión .abs, el timbre cambia inmediatamente, visto que, al tener valores negativos en algunos armónicos, esos se apagan, o sea, dejan simplemente de sonar.

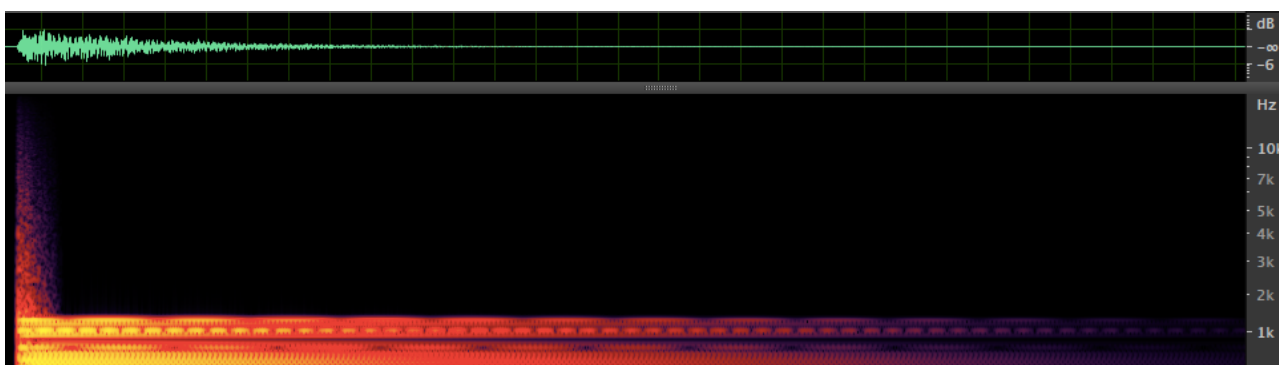
Nos parece que las dos opciones son interesantes y, en vez de decantarnos por una de las dos, utilizamos ambas en nuestra experimentación y hacemos una comparación con el timbre que se creó con la experimentación anterior. Para ello, se han grabado dos cadenas con la misma frecuencia que el sonido pulsado de la experimentación anterior, una con armónicos con valores absolutos y otra con valores positivos y negativos. Estos sonidos están registrados en el apéndice 5.1., en la subcarpeta 6 (Ejemplos) como archivos 11 y 12 respectivamente con y sin valores absolutos:



**Fig. 105.** Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos y de sus dinámicas, con valores absolutos.



**Fig. 106.** Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos y de sus dinámicas, sin valores absolutos.



**Fig. 103 (bis).** Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos.

Si comparamos los tres espectros anteriores, podemos ver que los tres son muy parecidos, pero tienen pequeñas diferencias entre ellos; la figura 103 bis es el primer experimento, con modulación de armónicos y dinámicas lineales. Es evidente que el espectro es más lleno, aunque podemos ver muchos detalles que comparte con los otros sonidos, como fase e intermitencia de sus armónicos. En la figura 105 podemos observar cómo algunos armónicos se apagan u oscilan más, vistas las dinámicas irregulares que se les otorga y, por fin, en la figura 106 cómo hay todavía más espacios sin espectro en el sonido, visto que algunos armónicos se apagan por completo. Alcanzado este momento de la experimentación es muy interesante realizar un ejercicio perceptivo comparando auditivamente esos tres timbres que están grabados en el apartado 5.1., carpeta 6, archivos 10, 11 y 12 y apreciar cómo el sonido se escucha más «apagado» en cada uno de esos archivos.

Damos por terminada la experimentación de nuestra teoría II, cosechando resultados satisfactorios hasta el momento, ya que los timbres generados acompañan la idea generativa que los idealiza. Volveremos a estos sonidos para analizarlos desde el lado perceptivo en el apartado 3 y a través de una encuesta como antes ya se mencionó.

Sin embargo, quedan todavía algunas otras ideas que se pueden añadir a esta experimentación, como puede ser la de reverberación que logra ser artífice de una percepción diferente del timbre, y a la que vamos a conectar con una idea generativa asociada igualmente a nuestros algoritmos.

## **2.3. Elementos musicales generados o controlados por algoritmos**

### **2.3.1. Teoría III: La reverberación**

Un evento sonoro que alcanza nuestros oídos contiene toda la información acústica de la sala donde es generado. Esto incluye las mismas características de la sala, donde la fuente de sonido no llega única y directamente a nuestros oídos, pero llega de manera secundaria y a través de las reflexiones de las paredes, donde la impresión sonora es deformada por las características de la sala. El evento que constituye el ataque del sonido es extendido a nuestros oídos por lo menos hasta la última reflexión del mismo, que es la que recoge más tiempo y llega más tarde. (Winkel, 1967, p. 58)

A ese conjunto de reflexiones del sonido le llamamos reverberación y difiere del eco, que es una repetición retrasada del sonido, por su tiempo de reverberación; eso quiere decir que, si la última reflexión del sonido llega a nuestros oídos más tarde que 50 ms después de que ese sonido fuera emitido, lo percibiríamos como un efecto de eco.

Esos aspectos de la acústica real deben ser considerados cuando creamos una reverberación electroacústica, para que su resultado pueda ser percibido por nuestros oídos como una reverberación que define un espacio. Sin embargo, ese es el punto de inflexión que difiere la acústica real de la acústica electrónica: la imposibilidad de existencia en la acústica real a través de la creación de un espacio virtual que no está definido por paredes, absorciones u otros elementos que puedan influenciar en su ambiente acústico, pero sí basado en tiempos de reflexión, divididos entre inmediatos, medianos y largos, así como su decaída a lo largo del tiempo.

La reverberación virtual no es un fenómeno novedoso y son innumerables las fórmulas y algoritmos que fueron desarrollados para crear ambientes virtuales que pueden ser utilizados en una grabación o sonido electrónico. Por un lado, esa ya experimentada faceta de la música acústica y electroacústica de la actualidad nos brinda una facilidad de experimentar con los elementos ya desarrollados en ese ámbito y a los que se puede



acceder fácilmente a través de programas como los que venimos utilizando en esta investigación. Por otro lado, crear un ambiente virtual diferente al que estamos acostumbrados puede ser tarea complicada y redundante si llegamos a una reverberación que no nos ofrece nada nuevo a nuestros oídos actuales y tan experimentados.

La teoría que buscamos aplicar aquí como idea generacional es la de desconectarse de los espacios acústicos existentes en la realidad, así como de fórmulas frecuentes de crear espacios virtuales aplicables a grabaciones o sonidos electroacústicos y dar un paso a un proceso generativo que nos permita obtener un resultado inesperado, quizás. Esa es la idea general de la composición algorítmica, el génesis de todos los elementos musicales que deseamos. Apliquemos esa idea generativa, o sea, de composición algorítmica también a la reverberación y analicemos sus resultados, como anteriormente, a través de un prisma científico en este apartado y su funcionalidad psicoacústica desde su análisis perceptivo en el apartado 3.

La técnica que desarrollaremos en este apartado, como antes pudimos leer, se basará en la reverberación y en sus reflexiones inmediatas, medianas y largas, así como en su tiempo de decaída. Para ello, desarrollaremos un código en SuperCollider donde tomamos como teoría la utilización de los valores de respuesta del algoritmo de Mandelbrot y lo aplicaremos en las duraciones de esas diferentes reflexiones que provienen de los sonidos generados dentro de ese ambiente virtual que estamos creando. Para ello, se generan tres tipos de reflexión diferentes (rápida, media y larga) utilizando 12 unidades CombL, que son generadores de retrasos de sonido lineal y luego las sumamos y la repasamos dentro de cuatro unidades de AllpassN, para crear una difusión mayor en el sonido reflejado. Pedimos a SuperCollider que recoja los 12 primeros valores de respuesta del algoritmo de Mandelbrot en una primera instancia y permutamos esos valores en el *tiempo máximo de retraso*, *tiempo de retraso* y *tiempo de decaída* que son argumentos de las unidades CombL. Para ajustar esos valores al rango aplicable a esos argumentos, dividiremos por 10 los valores de respuesta de Mandelbrot y lo aplicaremos en los dos primeros argumentos (*tiempo máximo de retraso* y *tiempo de retraso*) y multiplicaremos las siguientes respuestas por 4 para los valores del *tiempo de decaída* para las reflexiones rápidas. Para las reflexiones medias, dividiremos por 8 los valores de respuesta para el *tiempo máximo de retraso*, dividiremos por 10 el *tiempo de retraso* y multiplicaremos por 10 el *tiempo de decaída* y para las reflexiones largas, dividiremos por 8 el *tiempo máximo de retraso*, dividiremos por 8 el *tiempo de retraso* y multiplicaremos por 10 el *tiempo de decaída*.

Al sumar todos esos valores, los pasamos por filtros AllpassN, que son fijos, o sea, sin valores de la ecuación, para ajustar un poco la difusión en el sonido y distinguirlo así de la fuente original.

Para que entendamos o podamos hacer una imagen mental de todo el proceso que ocurre en esta reverberación, definamos lo que son los filtros Comb y Allpass:

- El filtro Comb es un filtro que agrega una versión retardada de una copia de la señal entrante, causando interferencias tanto constructivas como destructivas. La respuesta de la señal de ese filtro consiste en una serie de muescas regularmente espaciadas, que se parecen a un peine, y que originan el nombre del filtro (*comb* en inglés significa «peine»).

Eso quiere decir que al aplicar nuestro filtro a una señal entrante, esa señal se multiplica en diversas copias de sí mismo, pero con diferentes tiempos de respuesta y duración, que simularán las diferentes reflexiones que deseamos.

- Un filtro Allpass (traducido como «filtro de paso total») es un filtro que permite pasar todas las frecuencias entrantes por igual en ganancia, pero su respuesta cambia la relación de fase entre varias frecuencias.

Si entendemos como fase la diferencia de tiempo hasta que empiezan dos frecuencias iguales, podemos comprender que lo que hace ese filtro es crear difusión en la señal, o sea, dar esa respuesta menos precisa de las frecuencias que pasan por él. Si multiplicamos por 4 filtros diferentes, y al actuar en frecuencias diferentes, el resultado se hace más interesante en sonoridad.

Entendidos todos esos métodos y la utilización del algoritmo en este proceso, procedemos a implementar todas esas ideas en un código estático, o sea, en el que no podamos cambiar los valores de la ecuación por ahora, para poder escuchar y regular a nuestra exigencia la respuesta final de la reverberación:

```
(
{ // Reverberación Mandelbrot
1.   var a, b, n, s, y1, y2, y3, y4, y1b, y2b, y3b, y4b, y5b, y6b, y7b, y8b, y = 1, x1, x2, x3,
x4;

      // estas son las variables de la reverberación Mandelbrot. a y b son responsables
de los valores de respuesta de la ecuación; s genera frecuencias percusivas aleatorias; de
y1 a y8b los generadores de retraso CombL y de x1 a x4, los generadores de retraso
AllpassN
```

```

2.    a = Pmandel(0, -1.95, inf).asStream;
3.    b = a.nextN(12).abs;
4.    s = Mix.fill(10, { Resonz.ar(Dust.ar(0.2, 50), 200 + 3000.0.rand, 0.003)});
5.    y1 = CombL.ar(s, b[0]/10, b[1]/10, b[0]*4, 0.5); //Aquí se puede apreciar como los
valores de Mandelbrot (b) se aplican en los argumentos del CombL. b[0] es el primer valor
de Mandelbrot, b[1] el segundo y así consecuentemente
6.    y2 = CombL.ar(s, b[1]/10, b[2]/10, b[1]*4, 0.5);
7.    y3 = CombL.ar(s, b[2]/10, b[3]/10, b[2]*4, 0.5);
8.    y4 = CombL.ar(s, b[3]/10, b[4]/10, b[3]*4, 0.5);
9.    y1b = CombL.ar(s, b[5]/8, b[6]/8, b[5]*10, 0.5);
10.   y2b = CombL.ar(s, b[6]/8, b[7]/8, b[6]*10, 0.5);
11.   y3b = CombL.ar(s, b[7]/8, b[8]/8, b[7]*10, 0.5);
12.   y4b = CombL.ar(s, b[8]/8, b[9]/8, b[8]*10, 0.5);
13.   y5b = CombL.ar(s, b[9]/8, b[10]/10, b[9]*10, 0.5);
14.   y6b = CombL.ar(s, b[10]/8, b[11]/10, b[10]*10, 0.5);
15.   y7b = CombL.ar(s, b[11]/8, b[12]/10, b[11]*10, 0.5);
16.   y8b = CombL.ar(s, b[12]/8, b[0]/10, b[12]*10, 0.5);
17.   y= y1+y2+y3+y4+y1b+y2b+y3b+y4b+y5b+y6b+y7b+y8b; //Aquí se suman todos los
CombL
18.   x1 = AllpassN.ar(y, 0.050, [0.050.rand, 0.050.rand], 1);
19.   x2 = AllpassN.ar(y, 0.050, [0.050.rand, 0.050.rand], 1);
20.   x3 = AllpassN.ar(y, 0.050, [0.050.rand, 0.050.rand], 1);
21.   x4 = AllpassN.ar(y, 0.050, [0.050.rand, 0.050.rand], 1);
22.   y = y + (x1 +x2+x3+x4); //Aquí se suman todos los CombL anteriores con los
AllpassN
23.   s + (0.03*y) // Aquí se aplica todos los retrasos al sonido generado en la variable s
}.play
)

```

En el código anterior podemos ver todos los filtros explicados anteriormente, así como nuestro patrón creado anteriormente (Pmandel) para obtener las respuestas del algoritmo. Vale la pena entender la línea 4, que es la generadora del sonido que entra en esta reverberación Mandelbrot; en esa línea se crean 12 frecuencias aleatorias, cada vez que el código es validado en SuperCollider, creadas por un generador de pulsos dentro de un filtro resonante que resulta en las frecuencias establecidas anteriormente. Justo

después, ese sonido pasa por nuestra reverberación, que fue reajustada muchas veces en sus reflexiones para conseguir la profundidad y longitud de sonido que podemos escuchar, y como proponíamos anteriormente, con una sonoridad alejada de cualquier reverberación acústica que pueda existir en la realidad. El resultado sonoro de este código está grabado como archivo 18 en el apéndice 5.1., subcarpeta 6.

Sin embargo, la experimentación no termina aquí, este es el primer paso para conseguir la reverberación que deseamos y ajustarla hasta conseguir un resultado sonoro satisfactorio. Dado este primer paso, nos faltaría desarrollar un código que nos permitiese utilizar esta reverberación con nuestros sonidos contruidos en las teorías I y II, y lo más interesante será poder cambiar los tiempos de reverberación de acuerdo con los valores de Mandelbrot y apreciar los resultados sonoros que podemos conseguir como consecuencia de ese proyecto.

Para ello, vamos a unir este código de reverberación a los instrumentos que hemos desarrollado antes, haciendo así un instrumento doble, donde los sonidos generados por la teoría II pasan por la reverberación Mandelbrot y podamos controlar y manipular todas sus variables desde una rutina externa:

```
(
1. SynthDef(\motivoVerb,
2.    {l freq, out = 30, pan = 0, level = 1, h9 = 9, h10 = 10, h11 = 11, h12 = 12, h13 = 13,
   h14 = 14, h15 = 15, h16 = 16 l
3.      var amps, freqs, signal, envIndividual, envGlobal, trigger;
4.      freqs = freq * Array.series(8, 1, 1).reverse;
5.      freqs = freqs.add(freq*h9).add(freq*h10).add(freq*h11).add(freq*h12).add
   (freq*h13).add(freq*h14).add(freq*h15).add(freq*h16);
6.      amps = Array.geom(16, 0.6, 1.034);
7.      trigger = Impulse.ar(0.00001);
8.      signal = GrayNoise.ar(0.005);
9.      envIndividual = EnvGen.ar(Env.perc(0.01, 0.1), trigger);
10.     signal = signal * envIndividual;
11.     signal = Pan2.ar(
        Klank.ar(
            `[ freqs, amps, 2.5 ],
            signal
        ),
    ),
```

```

        pan
    );
12. envGlobal = EnvGen.ar(
        Env(
            [0,level,level,0],
            [0.01, 4, 0.01],
            \sine, 3, 0
        ),
        doneAction: 2
    );

13.      Out.ar(out, signal*envGlobal)
    }
).add;
14. SynthDef(\mandelbrotVerb2,
15.  {l v0=1, v1=1, v2=1, v3=1, v4=1, v5=1, v6=1, v7=1, v8=1, v9=1, v10=1, v11=1,
v12=1, transitionTime1 = 3, sustainTime = 3, transitionTime2 = 3, in l
16.      var s, y1, y2, y3, y4,y1b, y2b, y3b, y4b, y5b, y6b, y7b, y8b, y, x1, x2, x3, x4,
env;
17.      s = In.ar(in,2);
18.      y1 = CombL.ar(s, v0/10, v1/10, v0*4, 0.5);
19.      y2 = CombL.ar(s, v1/10, v2/10, v1*4, 0.5);
20.      y3 = CombL.ar(s, v2/10, v3/10, v2*4, 0.5);
21.      y4 = CombL.ar(s, v3/10, v4/10, v3*4, 0.5);
22.      y1b = CombL.ar(s, v5/8, v6/8, v5*10, 0.5);
23.      y2b = CombL.ar(s, v6/8, v7/8, v6*10, 0.5);
24.      y3b = CombL.ar(s, v7/8, v8/8, v7*10, 0.5);
25.      y4b = CombL.ar(s, v8/8, v9/8, v8*10, 0.5);
26.      y5b = CombL.ar(s, v9/8, v10/10, v9*10, 0.5);
27.      y6b = CombL.ar(s, v10/8, v11/10, v10*10, 0.5);
28.      y7b = CombL.ar(s, v11/8, v12/10, v11*10, 0.5);
29.      y8b = CombL.ar(s, v12/8, v0/10, v12*10, 0.5);
30.      y= y1+y2+y3+y4+y1b+y2b+y3b+y4b+y5b+y6b+y7b+y8b;
31.      y = LeakDC.ar(y);
32.      x1 = AllpassN.ar(y, 0.050, [0.050.rand, 0.050.rand], 1);

```

```

33.  x2 = AllpassN.ar(y, 0.050, [0.050.rand, 0.050.rand], 1);
34.  x3 = AllpassN.ar(y, 0.050, [0.050.rand, 0.050.rand], 1);
35.  x4 = AllpassN.ar(y, 0.050, [0.050.rand, 0.050.rand], 1);
36.  y = y + (x1 +x2+x3+x4);
37.  s = s + (0.03* y);
38.      env = EnvGen.ar(
                                Env(
                                    [0,1,1,0],
                                    [0.01, 15, 0.01],
                                    \sine, 3, 0
                                ),
                                doneAction: 2
                                );
39.      Out.ar(0, s*env)
    }
).add
)

```

Como podemos observar en el código anterior, las líneas 1 a 13 son exactamente iguales que el código de sonido pulsado desarrollado en la teoría II y las líneas 14 hasta 39 son idénticas a las de la reverberación Mandelbrot. Sin embargo, están fundidas en el mismo código para que funcionen juntas, y el detalle que las difiere de los códigos anteriores está justamente en las líneas 13 y 17, que son consecutivamente la salida del sonido pulsado del primer instrumento motivoVerb y la entrada del mismo a la reverberación. Para que el sonido pulsado no se escuche sin que pase antes por la reverberación, lo enviamos en la línea 13 al canal de salida 30. En una disposición estéreo, los canales que se escuchan exteriormente, serían 0 y 1, como derecha e izquierda. El canal 30, por lo tanto, queda fuera de los canales audibles en estéreo y, por lo tanto, el sonido que escuchamos en la teoría II pasará por ese canal no audible y entrará en la línea 17, nuestra reverberación, que se llama ahora mandelbrotVerb2. Ese sonido pasa ahora, por lo tanto, por el instrumento de reverberación y sale, en la línea 39, por los canales 0 y 1. De esa forma, escuchamos únicamente ese sonido con la reverberación Mandelbrot.

Llegados a este último paso, volvemos a desarrollar un código de rutina en SuperCollider para controlar tanto los armónicos como las reflexiones de la reverberación según las proporciones matemáticas del algoritmo de Mandelbrot:

```
(
1. var stream, offset, n;
2. stream = Pmandel(0, -1.95).asStream;
3. offset = Pseq([ 0, 0, 2, 2 ], inf).asStream;
4. n = stream.nextN(12).abs;
5. Routine({
6.         inf.do({
7.             n = stream.nextN(13).abs;
8.             b = stream.nextN(8).abs;
9.             Synth(\motivoVerb, [
10.                 \freq, (80),
11.                 \out, 30 + offset.next,
12.                 \h9, (9 + b[0]),
13.                 \h10, (10 + b[1]),
14.                 \h11, (11 + b[2]),
15.                 \h12, (12 + b[3]),
16.                 \h13, (13 + b[4]),
17.                 \h14, (14 + b[5]),
18.                 \h15, (15 + b[6]),
19.                 \h16, (16 + b[7]),
                                     ], addAction: \addToHead);
20.             Synth(\mandelbrotVerb2, [
21.                 \in, 30 + offset.next,
22.                 \v0, (n[0]),
23.                 \v1, (n[1]),
24.                 \v2, (n[2]),
25.                 \v3, (n[3]),
26.                 \v4, (n[4]),
27.                 \v5, (n[5]),
28.                 \v6, (n[6]),
29.                 \v7, (n[7]),
```

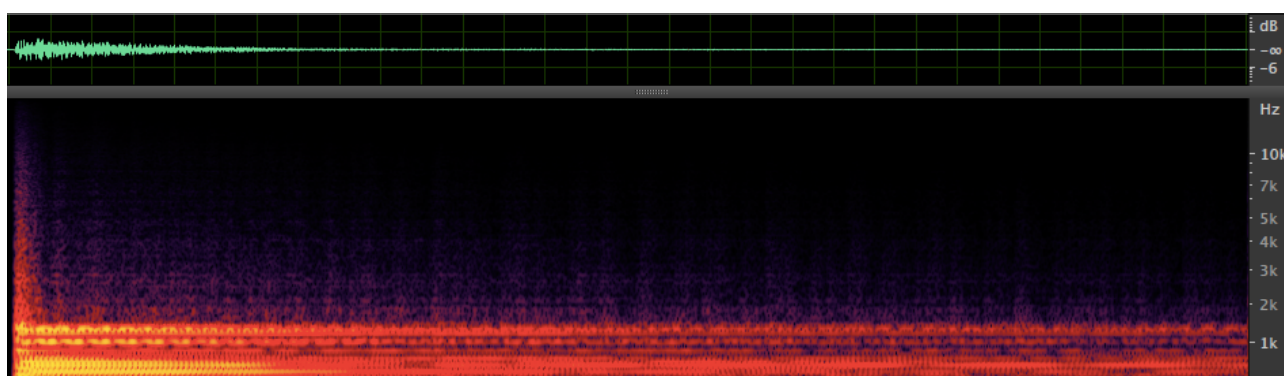
```

30.          \v8, (n[8]),
31.          \v9, (n[9]),
32.          \v10, (n[10]),
33.          \v11, (n[11]),
34.          \v12, (n[12]),
              ], addAction: \addToTail);
35.      3.wait;
          })
      }).play
  )

```

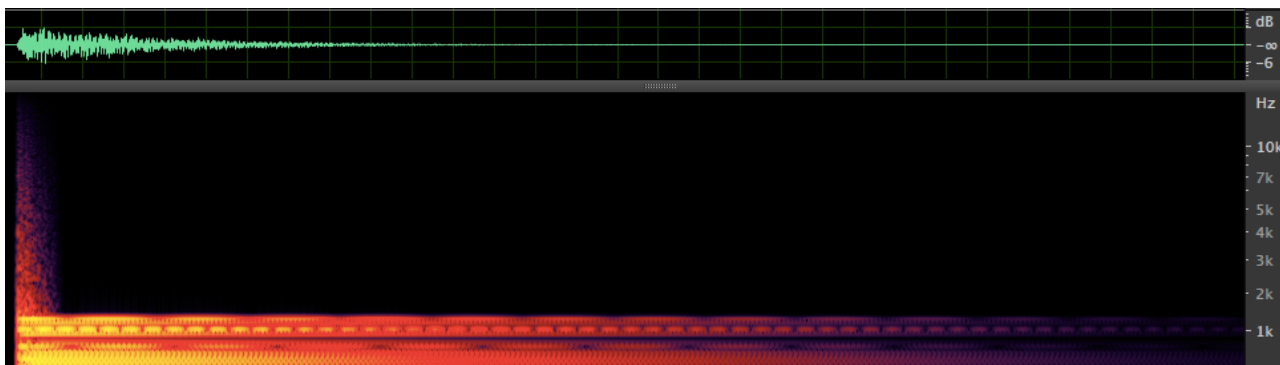
En esta rutina podemos ver cómo controlamos los dos instrumentos, el de sonidos pulsados y la reverberación, insertando valores de una cadena de Mandelbrot a través del patrón antes desarrollado y definido en la línea 2. Las líneas 12 a 19 informan al primer instrumento los valores que deben ser considerados de la cadena de Mandelbrot para los armónicos y las líneas 22 a 34 informan los valores a la reverberación. Aunque esta combinación de cambios de armónicos a la vez que el cambio de reverberación en cada pulsación del sonido no es la mejor para detectar o apreciar las diferentes reverberaciones que se puedan generar, es importante para la comparación de la misma frecuencia y cadena de Mandelbrot que hemos utilizado en los ejemplos de sonidos anteriormente. Así que grabamos esa misma secuencia de sonidos pulsados con frecuencia de 80 Hz y cambios de armónicos de acuerdo con la cadena de Mandelbrot 1,95 y la misma cadena para la reverberación. Esos sonidos están grabados como archivo número 13 en la subcarpeta 6 del apéndice 5.1.

Analicemos su espectro antes de comentar el resultado final del sonido:



**Fig. 107.** Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos y con reverberación algorítmica.



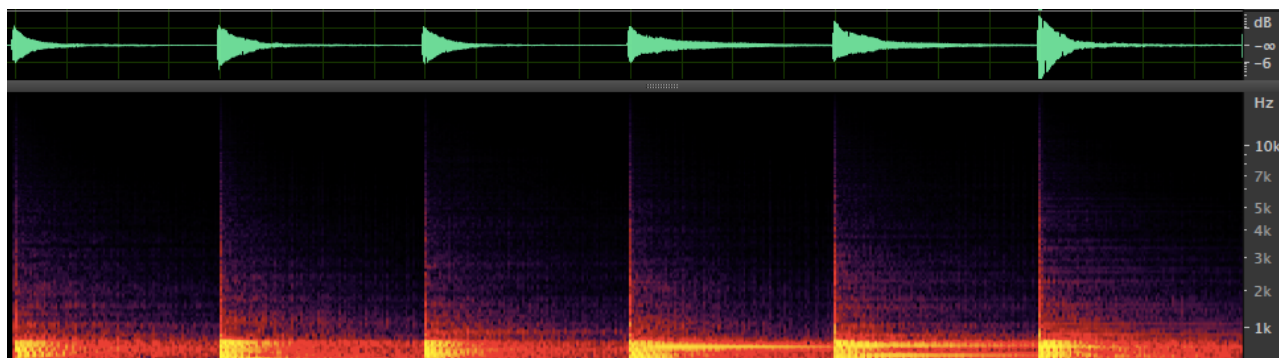


**Fig. 103 (bis).** Forma de onda y análisis espectral de un sonido pulsado generado por la teoría II con manipulación de sus armónicos.

Si analizamos su espectro y lo comparamos con la misma pulsación sin reverberación, podemos notar tres características del sonido sin reflexionar mucho y como consecuencia de la reverberación: Los sonidos tienen menos intensidad y, de acuerdo con la difusión que reciben de las reflexiones de la reverberación, el sonido es mucho más largo, como consecuencia del tiempo de reverberación. Hay una nube de armónicos por encima y a lo largo de todo el sonido, que son armónicos adicionales generados por las diferentes reflexiones del sonido. Obviamente, y en consecuencia con todo lo que hemos analizado y comentado sobre la generación de timbre anteriormente, podemos concluir que todas esas características conllevan a una modificación tímbrica notable, consecuencia de la reverberación. Vale la pena, sin embargo, comparar los archivos de 9 a 13 de la subcarpeta 6 del apartado 5.1., para que se noten las diferencias tímbricas de todos los ejemplos que hemos desarrollado del mismo sonido base creado por la teoría II.

Si escuchamos las cinco pulsaciones que están grabadas en ese archivo sonoro 13, podemos apreciar que, por ejemplo, en la tercera pulsación del sonido, se escucha una supervaloración de un armónico, que se amplifica claramente, expandiendo así la percepción de ese timbre, especialmente si lo comparamos con el mismo sonido sin reverberación. Eso pasa por los diferentes tiempos de reflexión que son modificados por los valores de Mandelbrot en cada pulso del sonido, que refleja como consecuencia alguna frecuencia más que la otra. Como antes comentamos, este no es el mejor ejemplo para percibir esos cambios de reverberación, así que estudiemos un ejemplo con esas mismas pulsaciones, o sea, el mismo sonido pulsado, pero con una frecuencia más grave para que los armónicos estén en una zona de resonancia más audible para nuestros oídos y sin cambiar los armónicos. O sea, que cada pulsación del sonido tenga nuevos valores de reflexión para la reverberación, pero no haya cambios de los armónicos, para que podamos escuchar el efecto de la reverberación en el mismo sonido y las diferencias

tímbricas que pueda provocar. Ese sonido está grabado en el apéndice 5.1., subcarpeta 5, *Ejemplo 6*, y es un sonido que también utilizaremos en nuestra encuesta:



**Fig. 108.** Forma de onda y análisis espectral de varios sonidos pulsados generado por la teoría II sin manipulación de sus armónicos y con cambio de tiempos de reverberación en cada pulsación.

Este es el análisis que nos hace percibir cómo el cambio de tiempo de reverberación afecta a la resonancia e incluso la amplitud de los armónicos del sonido. Podemos ver cómo las zonas amarillas se distinguen unas de las otras y cómo en el cuarto y quinto latido, uno y dos de sus armónicos consecutivamente se amplifican considerablemente por encima de los otros, creando un efecto de modificación tímbrica o expansión que es claramente audible en la grabación de ese sonido.

Con todos estos datos podemos hacer una breve conclusión de cómo hemos podido averiguar y analizar satisfactoriamente la producción de una reverberación electrónica que no podría existir en la acústica real, cómo manipularla con una idea algorítmica por detrás de la misma y los resultados claros de esas ideas en los sonidos y timbres generados. La experimentación con reverberación se puede dar por completa y haremos otro análisis a través del prisma perceptivo en el apartado 3 y a través de una encuesta, como antes ya se ha mencionado.

En el próximo apartado se procederá a generar una espacialización con ideas algorítmicas y, obviamente, conectada a nuestros algoritmos más relevantes.

### 2.3.2. Teoría IV: Panoramización tridimensional

Desde principios de los años 60, los compositores de música electroacústica se han preocupado por la espacialización del sonido. El sonido espacializado consiste principalmente en usar varios altavoces y enviar la señal correcta a cada uno de ellos.

Esta técnica tiene como principales propósitos sumergir al oyente dentro del sonido; distribuir el sonido en grandes espacios para una mejor calidad, inteligibilidad y

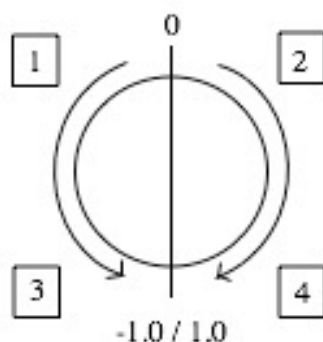
homogeneidad; separar diferentes partes de la música en el espacio, agregar dimensiones de interpretación e interpretación en vivo a una música fija en medios; hacer que las escenas de audio sean más realistas o más efectivas; modificar la acústica de los lugares y simular diferentes respuestas arquitectónicas y producir efectos especiales de distribución y movimiento; entre muchos otros.

De acuerdo con estas necesidades, artistas, investigadores e ingenieros desarrollaron diferentes habilidades y herramientas. Algunos compositores de música electroacústica se convirtieron en buenos especialistas en componer música con el objetivo de ser ejecutados en dispositivos espaciales y muchas técnicas diferentes han sido desarrolladas a lo largo de las últimas décadas para una ejecución más exacta y fiel del sonido repartido en el espacio.

La utilización de múltiples altavoces dispuestos en diferentes formatos de ubicación a lo largo de un espacio disponible, con los oyentes situados dentro de ese espacio demarcado por los altavoces es la técnica más utilizada de espacialización del sonido. Con esa técnica surge la división de canales, para poder situar el sonido en los diferentes altavoces disponibles, de tal manera que cada altavoz está representado por un canal diferente y a la vez, es decir, la panoramización que es la técnica de hacer una transición del sonido entre los diferentes altavoces.

La primera idea, y que sigue siendo utilizada hasta hoy para transitar el sonido entre los altavoces (panoramización) es la de hacer un cambio proporcional de amplitud (volumen del sonido) entre un altavoz y el otro, obteniendo así un efecto similar al sentir que el sonido se «mueve» de un lado al otro. Como ejemplo más técnico, digamos que el altavoz con amplitud mínima (sin sonar) tiene un valor 0 y con amplitud máxima, un valor 1. Haciendo la panoramización tradicional, el primer altavoz pasaría a la amplitud de 0,1 y el segundo a 0,9; enseguida el primero a 0,2 y el segundo a 0,8 y así consecutivamente, haciendo una transición más lenta o más rápida, según la necesidad del compositor, entre ambos altavoces.

En cuanto al número de altavoces, algunas disposiciones se hicieron estándar, como el estéreo (dos canales) y cuatro canales distribuidos en una disposición cuadrilátera, por su viabilidad, facilidad de ejecución y de composición. La expansión en dos dimensiones del sonido que se hace posible a partir de cuatro canales puede ser controlada, por ejemplo, por un sistema que conocemos como Azimuth, o sea, con la panoramización distribuida en un sistema circular, como podemos ver en la figura siguiente, donde el lado izquierdo comprende los valores de 0 a -1 y el lado derecho, los valores de 0 a 1:



**Fig. 109.** Croquis de una panoramización Azimuth a cuatro canales y sus valores de panoramización.<sup>24</sup>

Ese sistema es utilizado incluso con múltiples altavoces ubicados en dos dimensiones, donde esa disposición estaría cerca de un valor determinado, como 0,5 a la mitad entre el altavoz 2 y 4 en la figura 109 y ese altavoz sonaría a su máxima amplitud cuando la panoramización pasase por ese valor.

Sin embargo, cuando nos planteamos una panoramización en tres dimensiones, ese sistema se torna complicado de utilizar, vistas todas las posibilidades existentes de distribución vertical entre los altavoces. La panoramización tridimensional es posible siempre y cuando se disponga de un sistema multicanal donde haya, como mínimo, 8 altavoces, para una disposición en cubo (4 altavoces al nivel del suelo y 4 localizados exactamente encima de estos y con una distancia vertical igual a la horizontal que los separa). El uso de más altavoces podría detallar sonoramente mejor el movimiento de la fuente sonora, pero su utilización es obviamente más compleja tanto en organización como en realización.

Para hacerlo más sencillo, la utilización de un sistema llamado Ambisonics es la más ideal para la realización de nuestra experimentación. El sistema de panoramización Ambisonics es un método para codificar un campo de sonido teniendo en cuenta sus propiedades direccionales. En diferencia al audio multicanal tradicional como hemos comentado anteriormente, en Ambisonics cada canal tiene información sobre ciertas propiedades físicas del campo acústico, como la presión o la velocidad acústica (Arteaga, 2015, p. 4). La principal ventaja de Ambisonics es su capacidad de reproducir un campo sonoro inmersivo, independiente del número y la posición de los altavoces y del oyente. Ambisonics proporciona el área de escucha más grande entre cualquier sistema de

<sup>24</sup> La figura 73 representa una panoramización a cuatro canales, donde los cuadrados numerados simbolizan los cuatro altavoces y su distribución espacial, hecha con el sistema antes descrito de 0 a 1 hacia la derecha y 0 a -1 hacia la izquierda. Eso ocasionaría, con la utilización de los algoritmos, una distribución del sonido por todo el área señalada por el círculo, conectada a una proporción aritmética.

sonido envolvente actual. Incluso caminando por fuera del arreglo de altavoces el oyente puede apreciar el campo sonoro con buena localización.

El sistema Ambisonics nunca disfrutó de gran popularidad en el mercado convencional desde su creación en los años 70 por Michael Gerzon. Sin embargo, su utilización en la música electrónica viene creciendo en los últimos años de tal manera que el ICST<sup>25</sup> (Institute for Computer Music and Sound Technology) de la Universidad de las Artes de Zúrich en Suiza desarrolló un complejo sistema de objetos Ambisonics para Max/MSP que pueden ser descargados libremente de su página web. Esos objetos incluyen múltiples posibilidades de panoramización utilizando Ambisonics, con cálculos de absorción, pérdida de energía según la distancia a la que se propaga el sonido, entre muchas otras, pero nos vamos a centrar en los objetos que nos servirán para desarrollar nuestra experimentación.

Lo más interesante de esos objetos es que ya están listos para una distribución del sonido en tres dimensiones y en hasta 32 canales diferentes. Nuestra experimentación, como se ha explicado antes, solamente necesita 8 canales, con lo cual utilizaremos únicamente dos objetos creados por el ICST: el Ambimonitor y el Ambipanning. El Ambimonitor es el mapeador de la disposición de los altavoces que tiene dos partes: la horizontal, que se ve como un círculo con dos líneas rojas que se cruzan al centro del objeto, y la vertical, que se ve como la mitad de la horizontal. En ese objeto establecemos la posición de los altavoces, tanto en su distribución horizontal como en vertical. Establecemos también la fuente sonora, que será conectada con el algoritmo que utilizaremos y, por lo tanto, moverá el sonido dentro del espacio comprendido en el mapeador. El otro objeto es el Ambipanning, que establece el número de altavoces que queremos, recoge la información del mapeador y la entrega a la salida designada a cada altavoz, según se ha designado en el mapeador. Podemos ver que el sistema para utilizar Ambisonics es bastante fácil gracias a esos objetos creados por el ICST.

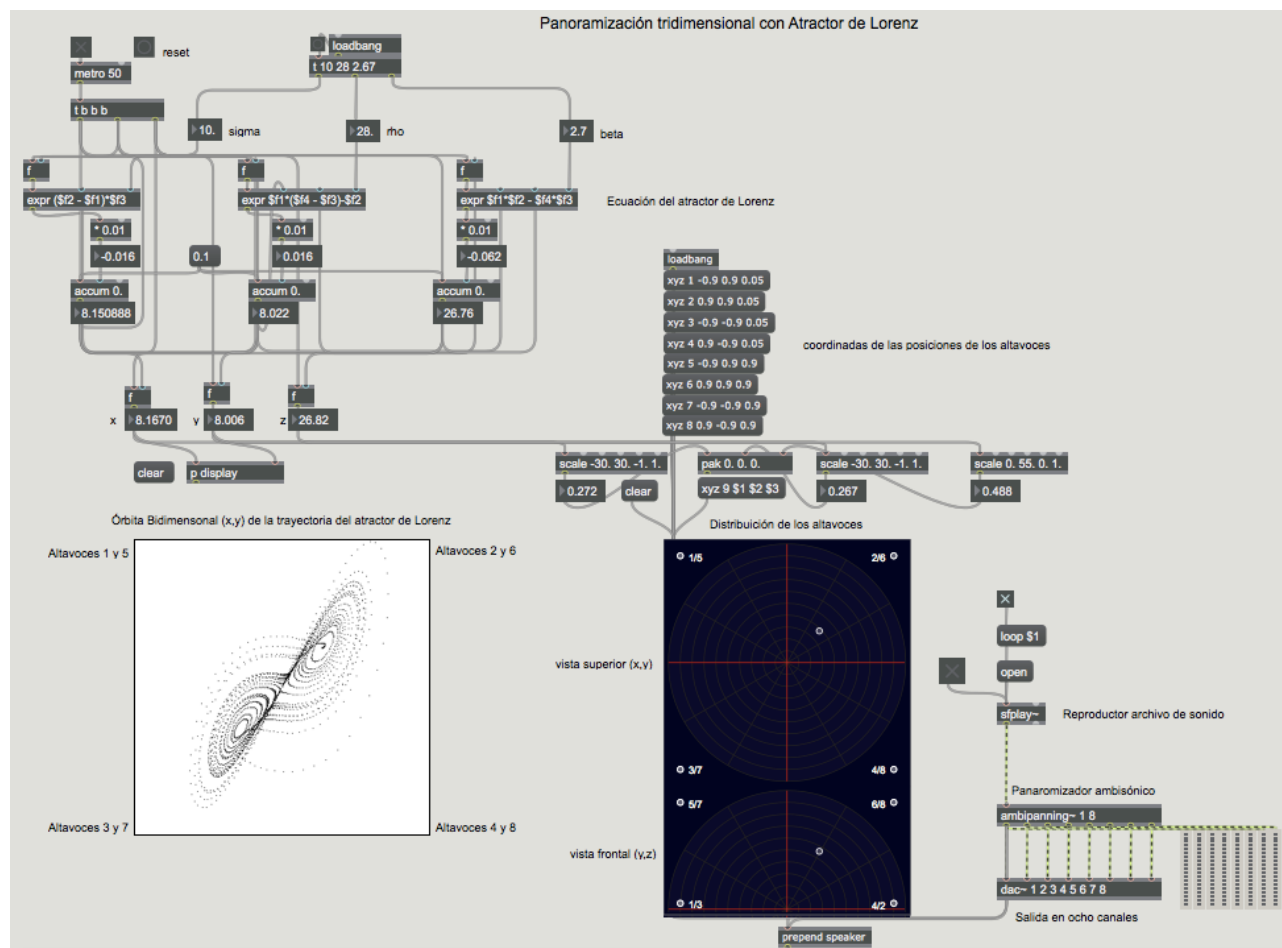
Para conectar esa estructura que es tridimensional a un algoritmo utilizaremos el atractor de Lorenz, que es un algoritmo tridimensional y su resultado es una forma elíptica que servirá para mover la fuente de sonido en su trayectoria. Para ello, simplemente, tenemos que conectar los resultados de x, y, z a nuestro mapeador, con un sistema de proporciones para que este pueda interpretarlos correctamente. Los valores para esa ecuación más utilizado son: para  $\sigma = 10$ ,  $\rho = 28$  y  $\beta = 2,7$ . Otro valor conocido es el  $\sigma = 28$ ,  $\rho = 46.92$ ,  $\beta = 4$ .

---

<sup>25</sup> <https://www.zhdk.ch/forschung/icst>. Última visita 07/08/2019.

Para que la curva que está trazando la cuenta sonora sea visible, añadiremos al patch una pequeña pantalla gráfica que imprimirá los resultados en dos dimensiones y de esa forma, podemos constatar igualmente si la curva trazada es correcta y similar a la que deseamos.

Veamos entonces el patch desarrollado y analicemos su funcionamiento y conexión con el atractor de Lorenz:



**Fig. 110.** Patch realizado en Max/MSP para la panoramización en tres dimensiones utilizando el atractor de Lorenz.

La figura 110 por lo tanto, nos enseña el *patch* de Max/MSP que realiza la panoramización en tres dimensiones siguiendo la órbita del atractor de Lorenz, con sus valores iniciales más clásicos ( $\sigma = 10$ ,  $\rho = 28$  y  $\beta = 2,7$ ).

Arriba en la parte izquierda tenemos un metrónomo cuyas pulsaciones demandan una nueva iteración de los tres axiomas del algoritmo, que están justamente abajo y dentro de los objetos que llevan *expr* al principio. Los resultados se devuelven a las mismas ecuaciones para preparar la próxima iteración y, a la vez, es escalonado para que sus valores sean utilizados tanto en los gráficos como en la panoramización. El gráfico de la derecha está formado por puntos que son resultados de los valores de x e y impulsados

por el metrónomo. El resultado, como se puede observar, es la órbita en dos dimensiones, sin la utilización del axioma z, o sea, la altura (comparar con la figura 42 en la que se ve el mismo gráfico en tres dimensiones). A la vez, esos valores impulsados por el metrónomo entran en nuestro monitor (objeto negro con los vértices rojos) que posiciona los altavoces y la fuente sonora. El círculo superior es la planta de los altavoces, o sea, los altavoces vistos desde arriba y están numerados 1/5, 2/6, etc.; eso quiere decir que el altavoz 1 es el primero a la izquierda y justo arriba está el altavoz 5 y así consecuentemente. El semicírculo de abajo es el posicionamiento vertical de los altavoces, donde 1/3 quiere decir el altavoz 1, primero a la izquierda y por detrás de este, el altavoz 3 y arriba del 1 el altavoz 5. El punto sin numeración es la fuente sonora, que se mueve de acuerdo con el gráfico al lado, pero podemos ver también su movimiento vertical a través del semicírculo inferior. Ese monitor envía la información, tanto de la posición de los altavoces como la de la fuente sonora al objeto al lado llamado *ambipanning*, que es el responsable por distribuir esa panoramización a las ocho salidas (justo abajo) hacia los altavoces. El objeto *sfplay* reproduce cualquier archivo sonoro que queramos establecer como fuente sonora. Utilizaremos como tal (fuente de sonido) nuestra onda MandelBrotL (con interpolación lineal).

El resultado de esta experimentación está grabado en el apéndice 5.1. y subcarpeta 6 como archivo sonoro número 14. Al ser un archivo en ocho canales, su ejecución necesita el sistema correcto para que se pueda apreciar el resultado final, siendo imposible hacerlo en un sistema estéreo común. El patch está así mismo grabado en el apéndice 5.1. subcarpeta 4 y libre para utilización y experimentación.

Podemos dar por terminada nuestra experimentación con panoramización tridimensional y considerar los resultados como satisfactorios en este momento. Por la imposibilidad de hacerle un análisis perceptivo en la encuesta por ser un audio de ocho canales, este apartado se queda, de momento, cerrado en ese sentido.

## 2.4. Conclusiones del apartado

En este apartado hemos definido teorías para generar timbres desde la síntesis no-estándar unida a ideas de composición algorítmica. Hemos buscado hacer una descripción desde el punto de vista más técnico y científico de la formación o generación del timbre en sí, así como un análisis igualmente científico de los resultados.

Podemos concluir aquí y como primera instancia que si analizamos todo lo comentado en este apartado y los archivos musicales generados, podemos demostrar

nuestra hipótesis: «La composición algorítmica genera microsonidos». Si el concepto de microsonidos como lo definimos antes se refiere a «principios de diseño musical más allá del nivel de las representaciones de notas u objetos sonoros», nuestros timbres desarrollados en el apartado representan el concepto de microsonidos y más allá también y cuanto a que: «Los conceptos y formalizaciones de la composición algorítmica asistida por ordenador pueden aplicarse potencialmente desde la construcción de piezas enteras, secciones y frases hasta la estructuración de los propios objetos de sonido»; queda demostrado que la composición algorítmica asistida por ordenador puede aplicarse a la estructuración de los propios objetos de sonido, nos queda por demostrar, y según la definición de Valsamakis (2013, p. 23), que nos parece acertada y muy descriptiva en relación a toda esta investigación, que los microsonidos pueden aplicarse en la construcción de piezas enteras. Para ello, vamos a desarrollar una composición que utilice únicamente los sonidos construidos en este apartado, trabajándolos en sus diferentes posibilidades y experimentando con sus límites.

Sin embargo, antes de empezar el trabajo en una composición musical, y aunque las ideas generacionales son la columna vertebral de esta tesis, donde el resultado puede ser algo inesperado o inaudito, ese resultado no deja de ser importante y, por supuesto, el objetivo final. Si las ideas que lo generan pueden y han sido logradas, así como demostrada su fidelidad al proyecto original añadido al satisfactorio análisis espectral, es momento de hacer un análisis perceptivo, a través de la audición y comparación de todos esos timbres conseguidos, llegando a una conclusión sobre su estética, la viabilidad en su uso, así como la intención de utilizarlos en proyectos sonoros o composiciones musicales en general.

Como pudimos comentar al principio del apartado, la definición de timbre es una tarea amplia y difícil de especificar, especialmente cuando centramos su definición en el lado perceptivo, ampliamente importante para su definición y contemplación, pero altamente influenciado por cuestiones culturales, acústicas y psicoacústicas.

Es importante aclarar en esta conclusión, que mi parecer perceptivo es igualmente influenciado y parcial, visto que, aparte de que soy artífice en el logro de esos timbres desarrollados en esta investigación, tengo una alta intencionalidad en demostrar su logro y obtener un resultado satisfactorio.

Por lo tanto, y analizados todos esos factores, hago hincapié en que las comparaciones perceptivas del timbre que expongo en esta conclusión son según mi propio criterio y carecen de ser comparadas con el criterio auditivo y perceptivo de personas ajenas a esta investigación. Para ello, he creado una encuesta, teniendo



cuidado de preparar ese análisis perceptivo dentro de aspectos de definición del timbre como culturales, acústicos y psicoacústicos, intentando obtener un material de contestación suficiente para contrastar mi opinión personal y posibles influencias no objetivas de mi percepción.

Antes de entrar más profundamente en esas cuestiones y en la encuesta en sí, procedamos a mis conclusiones y análisis comparativo y perceptivo de los sonidos desarrollados:

Observando y analizando el resultado tímbrico y comparándolo con la información expuesta en el apartado anterior sobre «síntesis no-estándar», como, por ejemplo, la teoría de la síntesis estocástica de Iannis Xenakis, podemos trazar algunos paralelismos entre los resultados obtenidos con la teoría I:

Xenakis comenta en su *Formalized music*, que, cuanto más periódica es la repetición de la forma de onda, más cercana sonará a una frecuencia determinada; mientras que cuanto más caótica sea la forma de onda, más cercana sonará a un ruido, o así reconocen nuestros oídos esa información. Si analizamos ese comentario hecho por Xenakis, podemos concluir que, debido a su experiencia o experimentación, ha llegado a esa conclusión que es puramente perceptiva, visto que el concepto de ruido abarca muchas posibilidades y puede variar de persona a persona y de acuerdo a su bagaje musical y cultural. Sin embargo, y como primicia de análisis perceptivo y comparativo, es un buen punto de partida para la comparación de timbres conseguidos.

Dicho eso y analizando inicialmente y perceptivamente la onda de Gauss, basada en el algoritmo del mapa iterativo de Gauss, el cual tiene como respuesta patrones numéricos periódicos, donde abundan más los valores positivos que negativos, tiene como resultado un timbre suave que podemos reconocer como frecuencia. Probando muchos valores diferentes en esa onda, podemos constatar que esa periodicidad que comentamos se traslada a prácticamente todos los valores iniciales, con pequeñas diferencias entre ellos que puedan apreciarse como una diferencia tímbrica sustancial.

Existe, sin embargo, como comentamos anteriormente en el análisis de esa onda en este apartado, una clara diferencia tímbrica entre la onda interpolada y sin interpolar. Aunque su respuesta algorítmica es idéntica, la forma de onda, como pudimos constatar, es diferente, así como los armónicos que genera, obteniendo en su versión no-interpolada como consecuencia un timbre más rústico, con detalles de ruido o quizás menos pulido como frecuencia, pero con potencia en su amplitud y agresividad, generadas por los diferentes armónicos que se suman al timbre, mientras el sonido es más plano y reconocible como onda sonora cuando ocurre esa interpolación, pero quizás, con menos

personalidad distintiva, menos potencia en su amplitud y más apagada tímbricamente. Probando no solamente con valores iniciales o haciendo una transición en el cambio de esos valores mientras la onda suena, no resultó ningún cambio tímbrico valioso en cuanto a su análisis perceptivo; sin embargo, probando con las frecuencias, algunos resultados interesantes, siempre desde mi punto de vista, en las frecuencias graves que utilizaremos como material composicional y más adelante en el desarrollo de nuestra obra experimental. Es trascendental cotejar en este momento las dos ondas a través de su escucha y compararlas con esta descripción personal. Los archivos están grabados en el apartado 5.1., subcarpeta 6 y son respectivamente una onda Gauss sin interpolación a 1000 Hz como archivo número 7 y, una onda Gauss interpolada a 1000 Hz como archivo número 8.

La onda Mandelbrot, que utiliza el algoritmo del conjunto de Mandelbrot y que tiene como respuestas valores numéricos periódicos, así como caóticos, resulta como un timbre experimental con muchas posibilidades tímbricas, ya que se puede conseguir desde frecuencias reconocibles, utilizando sus valores más periódicos, hasta ruidos complejos con sus valores más caóticos, pasando por un espectro intermedio muy rico en timbres y armónicos generados por esas transformaciones en la onda. También es posible hacer una transición entre frecuencia y ruido, modulando los valores de  $c$  en la onda en SuperCollider, mientras la onda suena y hacer un análisis perceptivo de este cambio.

Escuchemos el archivo sonoro *Ejemplo 2* que está en la subcarpeta 5 del apéndice 5.1. y que será ejemplo sonoro en la encuesta que proponemos. Es una frecuencia de una onda MandelbrotL (interpolada) en la cual se modula el valor de  $c$ , que es valor que inicia la respuesta algorítmica, pasando del -1,4 inicial hasta el -1,95 aleatoriamente en las dos direcciones, cambiando así la forma de onda. Podemos percibir cómo lo que suena a una frecuencia a 1000 Hz al principio se va transformando, se generan armónicos de octava más grave claramente según algunos valores que recoge esa modulación hasta llegar a un ruido muy complejo y volver otra vez a la frecuencia inicial.

Ese tipo de experimentación sonora obtiene un resultado muy satisfactorio tímbricamente y su utilización será considerada como material sonoro para la composición.

En cuanto a la diferencia entre la interpolación y no interpolación de la onda Mandelbrot, los resultados son paralelos y similares a los que obtenemos con la onda Gauss, matizados por una agresividad aún mayor en la no interpolación de la onda Mandelbrot y especialmente en valores caóticos generadores de ruido. Vale la pena la escucha comparativa de las dos ondas grabadas en el apéndice 5.1., subcarpeta 6,

números 1 a 6, donde están grabadas variaciones de esta onda, tanto en frecuencia como en forma de onda.

Como resultado de la teoría II, podemos concluir que la manipulación de las frecuencias de los armónicos con proporciones generadas según los valores de respuesta del algoritmo de Mandelbrot genera una diferencia sonora sensible a la percepción auditiva. Claro está que la estructura en sí del sonido genera por sí misma un timbre específico como resultado de la experimentación. La manipulación de los armónicos causa obviamente cambios sonoros, por ejemplo, si el sonido inicial se parece a una cuerda pulsada, al manipular sus armónicos, obtenemos como resultado un timbre más bien relacionado a un impacto metálico. Eso se debe a que los parciales de los sonidos no siguen el orden de armónicos consonantes, como antes se ha descrito, lo que justamente les da ese timbre que reconocemos como metálico. Después de varias pulsaciones del sonido, sin embargo, mi percepción se decanta a reconocer más claramente el cambio de los armónicos antes que un cambio tímbrico claro. Este es un aspecto que debemos contrastar en la encuesta, es de gran valor la percepción de otras personas, para poder ponderar mejor si a cada cambio en el orden de los armónicos conseguimos un cambio tímbrico o sencillamente un cambio de armónicos como percepción sonora.

Lo mismo sucede cuando utilizamos el mismo proceso pero con el sonido teñido. Se escucha, desde mi percepción, demasiado los armónicos, aunque sí se puede notar alguna diferencia tímbrica cuando esos se cambian, de nuevo, contrastar con otras opiniones en la encuesta será importante también. Si esos cambios se notan como cambios de armónicos o cambios de timbre, vistos que esos cambios pueden ser confundidos con un cambio de acordes, no quedando del todo claro un timbre específico. Sin embargo, el resultado sonoro es muy estético y crea un timbre que puede ser utilizado perfectamente como material compositivo, visto que genera cierta expectativa en su escucha debido a esos cambios de armónicos.

Al aplicar dinámicas al timbre pulsado de la teoría II también concluyen en un resultado tímbrico perceptible auditivamente, comparado con el sonido pulsado de la teoría II con dinámicas lineales. Cuando aplicamos los valores que obtenemos como resultado de la ecuación de Mandelbrot a la dinámica de los armónicos, obtenemos un timbre más apagado, inmediatamente perceptible comparado con el mismo sonido y con dinámicas lineales. Eso pasa porque algunos de los valores de respuesta de Mandelbrot son negativos y terminan por «apagar» el armónico, o sea, que su dinámica es tan pequeña que no lo escuchamos. Sin embargo, otros armónicos se amplifican y terminan por modificar el timbre original. Si aplicamos solamente valores positivos (absolutos) de la

respuesta de la ecuación de Mandelbrot, también obtenemos otra respuesta tímbrica diferente, visto que la presencia de algunos armónicos en el sonido se hace más relevante, influenciando su timbre de esa manera. Podemos concluir por lo tanto y en la teoría II, que la creación tanto del sonido pulsado como del teñido obtuvieron resultados satisfactorios como proyecto sonoro en sí, así como en la creación de un timbre estético y utilizable musicalmente como material compositivo. Nos falta por determinar más precisamente a través de una escucha ajena a la mía, si se termina por comprender un cambio de timbre en la misma variación de los armónicos. Vale repetir la escucha comparativa de los archivos sonoros 9 a 12 del apéndice 5.1., subcarpeta 6.

La reverberación con valores de reflexión basada en la respuesta del algoritmo de Mandelbrot también generó no solamente espacios virtuales diferentes y muy interesantes, pero su constante aplicación con la alteración de esas reflexiones en un espacio de tiempo periódico y repitiendo el mismo sonido para poder observar mejor esos cambios, nos permite percibir una alteración tímbrica, debido a la relevancia que esas reflexiones puedan tener en ciertos armónicos, donde algunos de ellos se hacen más presentes y audibles, obteniendo como resultado un cambio de timbre perceptual, sin que se altere absolutamente nada en el sonido. La reverberación no solamente altera la percepción del timbre, como bien sabemos y hemos comprobado en esta investigación, sino que ha creado un espacio acústico virtual original y que contribuye con una estética sonora en todos los ámbitos (sonidos) a los que la hemos aplicado. Queda aquí, por lo tanto, y como conclusión, una herramienta sonora aplicable a muchos materiales compositivos, no solamente de origen electrónico, sino también aplicable a grabaciones de campo o de otro tipo de origen, que implicaría virtualizar los sonidos a este espacio sonoro creado en nuestra experimentación.

Por último, la espacialización del sonido utilizando el algoritmo de Lorenz en tres dimensiones uniendo sus resultados para posicionar la fuente de sonido dentro de una distribución de altavoces en cubo (tridimensional en ocho canales) obtuvo un resultado muy satisfactorio y coherente con lo previsto y con una amplia posible aplicación. Estos resultados no pueden ser apreciados en una simple reproducción estéreo del archivo, lo que limita su escucha y apreciación perceptiva, pero la unión de la panoramización tridimensional con la utilización de la técnica de Ambisonics abre una posibilidad de utilización enorme de este proyecto, que puede emplear la percepción del espacio como fuente de material compositivo y llevar las composiciones musicales a otro nivel de apreciación y percepción. La conexión a un elemento como el algoritmo de Lorenz da

paso a la utilización de un sinfín de otras técnicas conceptuales de movimiento proporcional o irregular de la fuente sonora.

Aunque no es posible la escucha de esta experimentación con un sistema estéreo, queda registrada una grabación de su funcionamiento a ocho canales en el apéndice 5.1., subcarpeta 6, archivo sonoro número 14; así como el patch que la genera en el mismo apéndice, subcarpeta 4 para su futura reproducción o experimentación en un proyecto.

## 2.5. Bibliografía

Absil, F. (2015). *A Guide to Schillinger's Theory of Rhythm*. Amsterdam, ZH: Absil.

Andreyev, S. (2017, 14 de diciembre). Brian Ferneyhough's String Trio: Analysis.

Recuperado el 20 de agosto de 2019 de: [www.youtube.com/watch?v=bec1B3h3F4g](http://www.youtube.com/watch?v=bec1B3h3F4g).

Ariza, C. (2005). *An Open Design for Computer-Aided Algorithmic Music Composition: athenaCL*. Boca Raton, FL: dissertation.com

Arteaga, D. (2015). Introduction to Ambisonics. *Àudio 3D – Escola Superior Politècnica Universitat Pompeu Fabra*. Recuperado el 20 de junio de 2020 de: [https://www.researchgate.net/publication/280010078\\_Introduction\\_to\\_Ambisonics](https://www.researchgate.net/publication/280010078_Introduction_to_Ambisonics).

Bewley, J. (2004). Lejaren A. Hiller: Computer Music Pioneer. *Music Library Exhibit*. Recuperado el 03 de septiembre de 2008 de: <https://cse.buffalo.edu/~rapaport/111F04/hillere Exhibits/summary.pdf>.

Besada, J.L. (1992). *Metamodels in Compositional Practices - The case of Alberto Posada's Liturgia Fractal*. Paris, IDF: Delatour editions.

Berg, P. (2009). Composing Sound Structures with Rules. *Contemporary Music Review*, 28:1, 75 - 87, DOI: 10.1080/07494460802664049.

Brebera, D. (2015). On the practical implementation of L-systems. Recuperado el 02 de enero de 2019 de: <http://www.naun.org/main/NAUN/computers/2015/a662007-088.pdf>

Brün, H. (1964?). Musical Ideas for Synthetic Sound. Recuperado el 09 de marzo de 2019 de: <https://sites.evergreen.edu/arunchandra/wp-content/uploads/sites/395/2018/05/synthetic.pdf>

Brün, H. and Chandra, A. (2001). A Manual for SAWDUST. Recuperado el 09 de marzo de 2019 de: <http://grace.evergreen.edu/~arunc/brun/sawdust>.

- Childs, E. (2002). Achorripsis: A sonification of probability distributions. *Proceedings of the 2002 International Conference on Auditory Display*. Recuperado el 04 de junio de 2018 de: <https://www.semanticscholar.org/paper/Achorripsis%3A-A-sonification-of-probability-Childs/bcb39214a74228766628baf5540ac2c269ea9689>.
- Di Scipio, A. (1994). Formal Processes of Timbre Composition Challenging the Dualistic Paradigm of Computer Music - A study in composition theory. Recuperado el 17 de julio de 2016 de: <https://quod.lib.umich.edu/i/icmc/bbp2372.1994.053/7/--formal-processes-of-timbre-composition-challenging?page=root;size=150;view=text>.
- Degazio, B. (1986). The Schillinger System of Musical Composition and Contemporary Computer. Recuperado el 25 de enero de 2018 de: [https://www.researchgate.net/publication/318421628\\_The\\_Schillinger\\_System\\_of\\_Musical\\_Composition\\_and\\_Contemporary\\_Computer\\_Music](https://www.researchgate.net/publication/318421628_The_Schillinger_System_of_Musical_Composition_and_Contemporary_Computer_Music).
- Döbereiner, L. (2011). Models of Constructed Sound: Nonstandard Synthesis as an Aesthetic Perspective. *Computer Music Journal*, vol. 35, no. 3, doi:10.1162/comj\_a\_00067.
- Dodge, C., Jerse, T. A. (1997). *Computer Music - synthesis, composition and performance*. New York, NY: Shirmer.
- Edwards, M. (2010). Algorithmic Composition: Computational Thinking in Music DRAFT. Recuperado el 03 de marzo de 2018 de: [https://www.academia.edu/654039/Algorithmic\\_Composition\\_Computational\\_Thinking\\_in\\_Music](https://www.academia.edu/654039/Algorithmic_Composition_Computational_Thinking_in_Music).
- Johnson, T. (2006). Self-Similar Structures in My Music: an Inventory. *Lecture presented on the MaMuX seminar IRCAM*. Recuperado el 22 de diciembre de 2018 de: [http://repmus.ircam.fr/\\_media/mamux/saisons/saison06-2006-2007/johnson-2006-10-14.pdf](http://repmus.ircam.fr/_media/mamux/saisons/saison06-2006-2007/johnson-2006-10-14.pdf).
- Jones, K. (1989). Generative Models in Computer-Assisted Musical Composition, *Contemporary Music Review*, 3: 1, 177 - 196, DOI: 10.1080/07494468900640121.

- Koenig, G. M. (1984). Programmed music. Recuperado el 09 de septiembre de 2018 de: [http://koenigproject.nl/wp/wp-content/uploads/2019/08/Programmed\\_Music.pdf](http://koenigproject.nl/wp/wp-content/uploads/2019/08/Programmed_Music.pdf).
- Lemaitre, G., Sueid, C. (2018). Acoustics and Psychoacoustics of Sound Scenes and Events. DOI: 10.1007/978-3-319-63450-0\_3
- Laurson, M., Kuuskankare, M. (2003). From RTM-notation to ENP-score-notation. Recuperado el 10 de enero de 2020 de: <http://jim.afim-asso.org/jim2003/articles/laurson.pdf>.
- Legard, P. (2014, 6 de junio). Kircher & Schott's Computer Music of the Baroque. Recuperado el 14 de agosto de 2019, de <https://larkfall.wordpress.com/2014/06/06/kircher-schotts-computer-music-of-the-baroque/>.
- Luque, S. (2006). Stochastic Synthesis: Origins and Extensions. *Institute of Sonology Royal Conservatory The Netherlands*. Recuperado el 30 de agosto de 2019 de: [www.sergioluque.com](http://www.sergioluque.com).
- Malt, M. (1998). L'utilisation de la composition Assistée par Ordinateur par Brian Ferneyhough, in *Compositeurs d'aujourd'hui, textes réunis par Peter Szendy*. París, IDF: IRCAM.
- McAdams, S., Giordano, B.L. (2008). The Perception of Musical Timbre. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199298457.013.0007.
- Nierhaus, G. (2009). *Algorithmic Composition - paradigms of automated music generation*. Viena, VIE: Springer.
- Okonşar, M. (2010), Overview of Pitch and Time Organization in Stockhausen's Klavierstück N.9. Recuperado el 14 de diciembre de 2017 de: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/04/Stockhausen.pdf>.
- Patidar, V. (2006). Co-existence of Regular and Chaotic Motions in the Gaussian Map. *Electronic Journal of Theoretical Physics* 3, 29–40. Recuperado el 18 de agosto de



2016 de: <https://www.semanticscholar.org/paper/Co-existence-of-Regular-and-Chaotic-Motions-in-the-Patidar/028f45f6b842331572ddd7f976ff0e4175b9bab4>.

Peitgen, H.O., Jürgens, H., and Saupe, D. (2004). *Chaos and Fractals - new frontiers of science*. New York, NY: Springer.

Peters, N., Lossius, T., Schacher, J. C., (2012). SpatDIF: Principles, Specification, and Examples. Recuperado el 09 de julio de 2017 de: [https://cnmat.berkeley.edu/sites/default/files/attachments/2012\\_SpatDIF\\_Principles\\_Specification\\_Examples.pdf](https://cnmat.berkeley.edu/sites/default/files/attachments/2012_SpatDIF_Principles_Specification_Examples.pdf)

Risset, J.C. (2003). Computer Music: Why?. Recuperado el 22 de diciembre de 2018 de: [https://liberalarts.utexas.edu/france-ut/\\_files/pdf/resources/risset\\_2.pdf](https://liberalarts.utexas.edu/france-ut/_files/pdf/resources/risset_2.pdf).

Roads, C. (1996). *The Computer Music Tutorial*. Cambridge, MA: MIT Press.

Sandred, Ö., Kuuskankare, M., Laurson, M. (2009). Revisiting the Illiac Suite - A rule-based approach to stochastic processes. Recuperado el 03 de septiembre de 2018 de: [https://www.researchgate.net/publication/260791942\\_Revisiting\\_the\\_Illiacc\\_Suite\\_-\\_A\\_rule-based\\_approach\\_to\\_stochastic\\_processes](https://www.researchgate.net/publication/260791942_Revisiting_the_Illiacc_Suite_-_A_rule-based_approach_to_stochastic_processes).

Schillinger, J. (2004). *The Schillinger system of musical composition*. Harwich Port, MA: Clock & Rose Press.

Siedenburg, K., McAdams, S. Four Distinctions for the Auditory “Wastebasket” of Timbre. *Frontiers in Psychology*. Vol. 8, Art. 1747. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.01747.

Skiadas, H.C., Dimotikalis, I., Skiadas, C. (2010). *Chaos Theory: Modeling, Simulation and Applications*. Singapur, SG: World Scientific.

Squibbs, R. (2006). The Composer’s Flair: *Achorripsis* as Music. Recuperado el 04 de junio de 2018 de: <http://cicm.mshparisnord.org/ColloqueXenakis/papers/Squibbs.pdf>.

Taube, H.K. (2004). *Notes from the Metalevel - An introduction to computer composition*. London, JS: Rutledge editorial.

- Thomson, P. (2004). Atoms and errors: towards a history and aesthetics of microsound. *Organised Sound*, 9(2), DOI: 10.1017/S1355771804000299.
- Thompson, W. F., Balkwill, L. L. (1999). A Cross-Cultural Investigation of the Perception of Emotion in Music: Psychophysical and Cultural Cues. Recuperado el 15 de junio de 2020 de: [https://www.researchgate.net/publication/209436270\\_A\\_Cross-Cultural\\_Investigation\\_of\\_the\\_Perception\\_of\\_Emotion\\_in\\_Music\\_Psychophysical\\_and\\_Cultural\\_Cues](https://www.researchgate.net/publication/209436270_A_Cross-Cultural_Investigation_of_the_Perception_of_Emotion_in_Music_Psychophysical_and_Cultural_Cues).
- Tsenova, V. (2002). Magic Numbers in the Music of Sofia Gubaidulina. *Muzikologija*, no. 2, DOI:10.2298/muz0202253t.
- Valsamakis, K. (2013). Non-Standard Sound Synthesis with Dynamic Models. Recuperado el 05 de junio de 2017 de: <https://pearl.plymouth.ac.uk/handle/10026.1/2841>.
- Velankar, M. (2013). Study paper for Timbre identification in sound. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 2 Issue 10. DOI: 10.13140/2.1.4565.0566.
- Von Helmholtz, H. (1885/1954). *On the Sensations of Tone Livre Sur la Musique*. Garden City, NY: Dover Books on Music.
- Winckel, F. (1967). *Music, Sound and Sensation: A Modern Exposition*. New York, NY: Dover Publications.
- Wong, C. L. (2016) The Fourth Movement of György Ligeti's Piano Concerto: Investigating the Musical-Mathematical Connection. *CUNY Academic Works*. Recuperado el 22 de diciembre de 2018 de: [https://academicworks.cuny.edu/gc\\_etds/1521](https://academicworks.cuny.edu/gc_etds/1521).
- Xenakis, I. (1992). *Formalized Music*. Hillsdale, NY: Pendragon Press.
- Xenakis, I. (1996). Determinacy and Indeterminacy. *Organised sound*, 1(3), 143-155. DOI: 10.1017/S1355771896000210.

### 3. Encuesta y resultados

En este apartado desarrollaremos una encuesta que será enviada a diferentes sujetos para que se contraste la percepción auditiva del investigador de los timbres desarrollados a lo largo de la experimentación con la síntesis no-estándar unida a la composición algorítmica de esta tesis.

Como se ha señalado en el apartado dos, la definición de timbre puede ser extremadamente compleja y puede abarcar más que un exhaustivo análisis científico como hemos realizado en el apartado 2, donde abordamos conceptos concretos del timbre tales como la forma de onda, la producción de armónicos, así como las dinámicas y duraciones de las mismas. Todos estos son conceptos técnicos y científicos que sirven para teorizar la construcción de timbres y para obtener un análisis más preciso de los resultados, precisión que se refiere a demostrar que parte de lo planeado se encuentra en el producto sonoro final. Sin embargo, y como comentamos muchas veces, el timbre es igualmente un concepto perceptivo del sonido que debe ser analizado de esa manera, si queremos obtener un análisis estético y funcional del mismo.

El timbre se usa principalmente para referirse a las características de los eventos de sonido físicos. Estos no solo se pueden encontrar en disciplinas académicas adyacentes, como la teoría de la música o la recuperación de información musical, sino incluso en la psicología de la música, donde el término se usa a veces como una abreviatura de un evento sonoro o tono complejo, cuyo atributo perceptual relevante es el timbral en la naturaleza (Siedenburg y McAdams, 2017 p. 2). El lado psicológico de la percepción del timbre juega un rol muy importante en la percepción de estos tipos de sonidos experimentales y lo vamos a utilizar como estrategia en esta encuesta, y más exactamente en su manifestación desde el lado de la psicoacústica. Otras estrategias importantes para una encuesta más rica en detalles perceptivos serían la aproximación cultural a esa percepción, así como la acústica.

Empezando por esta última, la acústica en la que se reproducen estos sonidos es única y tiene que ser percibida en su entorno ideal. Si consideramos que una sala o sus paredes funcionan como un instrumento musical, donde el sonido que emerge de una fuente sonora no llega directamente a nuestros oídos, pero es un resultado de múltiples reflexiones que tienen un tiempo determinado y contribuyen para una impresión completa del timbre, que está, por fin, alterado por las características de la sala (Winckel, 1967, p. 58), esas propiedades no pueden hacer parte de la estrategia que abarcaremos con relación al lado acústico, visto que todos deben percibir el timbre de la misma forma, para

tener una respuesta homogénea de su percepción. Imaginemos que esos timbres generados en nuestra experimentación necesitan dispositivos electrónicos para existir, la eliminación de una interferencia acústica real en donde serán reproducidos solo puede existir a través de la utilización de auriculares que pueden causar alguna alteración debido a su calidad o característica (intraurales o circumaurales), pero el resultado siempre será más fiel que utilizando los altavoces del ordenador o de un móvil, por ejemplo, ya que aparte de tener una amplitud limitada y ser afectados por la acústica ambiental del lugar de su reproducción, carecen de fidelidad sonora en las frecuencias graves, por ejemplo. Con lo cual le pediremos a los encuestados la utilización de auriculares para la escucha de los archivos sonoros.

Otra forma de escucha fiel a los archivos sería su reproducción por altavoces autoamplificados y con respuesta plana, que son los que los especialistas en sonidos electrónicos suelen utilizar, justamente por la reproducción precisa de los archivos sonoros. Visto que no todos los encuestados tienen en sus casas el acceso directo a esos altavoces, la estrategia sobre la percepción acústicamente correcta de los ejemplos sonoros solo puede ser realizada, de manera personal, a través de auriculares, que suelen ser adquiridos por una gran mayoría de manera más frecuente.

La percepción cultural del timbre juega un rol importante aquí, si tenemos en cuenta que la mayoría de las personas pueden basar su percepción musical, tanto a la emoción que transmite la música como a la percepción de intervalos o timbres, en aspectos de conocimiento de costumbres musicales o en principios perceptivos básicos que trascienden los límites culturales (Forde Thompson, 1999, pp. 43-44). Así que los encuestados deben ser personas que tienen una formación cultural de origen parecida, o sea, una formación musical avanzada. Vamos a excluir de esta encuesta, por lo tanto, a personas que no tengan una preparación musical avanzada, visto que las preguntas, en su mayoría, llevan conceptos musicales que no serían del todo comprendidos si participan sujetos que no tienen una base musical sólida, influenciando esos aspectos de conocimiento que creemos relevantes.

Definiendo mejor el perfil del encuestado, basemos la encuesta en tres tipos de profesionales de la música: especialistas en sonidos electrónicos, como pueden ser los artistas sonoros o compositores; no especialistas que tengan experiencia en trabajar o escuchar sonidos electrónicos, como pueden ser músicos intérpretes o compositores que no trabajen con electrónica y, por último, músicos intérpretes que no tengan mucha experiencia con sonidos electrónicos pero hayan tenido algún contacto tocando y tengan criterio para poder escuchar esos sonidos. Creando esas tres categorías, pienso que

tenemos tres niveles diferentes de percepción, desde los más especialistas hasta los menos, pero todos con su previo conocimiento o contacto con sonidos electrónicos que puedan servir de base para la escucha y comparación de los ejemplos que vamos a proponer. Aquí es, por lo tanto, donde el rol de la influencia cultural de los timbres de esta encuesta puede funcionar, o sea, la cultura musical tangente a la escucha y conocimientos previos de más o menos profundidad de sonidos electrónicos, o sea, una cultura musical especialista, que puede influenciar en la percepción de estos timbres. Obviamente, y como constataremos en el análisis de los resultados de la misma encuesta, podremos ponderar si esta estrategia fue la correcta y cómo puede haber afectado definitivamente en sus respuestas.

La poca homogeneidad de los encuestados y esos pequeños matices entre sus capacidades de escucha y experiencias sonoras, nos aboca a otro problema: la falta de efectivos que tengan esas capacidades. Por lo tanto, al hacer una encuesta que exija tal grado de capacidades de los encuestados se restringe el número de personas que las tengan, así que, como resultado limitaremos la participación en esta encuesta a pocas personas; concretamente serán siete los encuestados. Creemos que son suficientes para alcanzar el objetivo planteado.

La psicoacústica es extremadamente interesante e importante en esta encuesta, visto que extiende las posibilidades de analizar por donde pasa la escucha individual de cada encuestado. La psicoacústica tiene como objetivo establecer relaciones cuantitativas entre percepciones y propiedades acústicas de las señales. La frecuencia y el volumen son probablemente los elementos que más se relacionan con esas percepciones, pero otras percepciones añadidas se podrían denominar colectivamente como timbre (Lemaitre y Sueid, 2018, pp. 14-15).

Si la psicoacústica es la rama de la psicofísica que involucra el estudio científico de cómo los humanos perciben varios sonidos y, más específicamente, las respuestas psicológicas asociadas con el sonido, incluidos el ruido, el habla y la música, utilizaremos por lo tanto esa peculiaridad de la escucha de los timbres y sonidos intentando incluir en el cuestionario posibles respuestas que tengan el mismo significado en el producto sonoro, visto que son consecuencia de la manipulación de los sonidos, pero no su origen.

Queremos, por lo tanto, a través de la psicoacústica tener un punto de vista añadido a la escucha para detectar si los encuestados reciben únicamente el resultado o resultados tímbricos que generan la construcción o manipulación del sonido, o si detectan únicamente la raíz de la manipulación que los construye.

Otra estrategia necesaria es la de poner siempre la opción de «no percibo ningún cambio en los sonidos», con la intención de no forzar la escucha de ninguno de los encuestados a percibir un cambio obligatorio en ninguno de los archivos. Damos también la posibilidad de elegir hasta dos respuestas diferentes y hacemos una aclaración de que no existe una respuesta correcta, para que la libertad interpretativa de las preguntas sea aún mayor.

Como estructura de la encuesta, procederemos a redactarla con siete preguntas que se refieren a seis ejemplos sonoros diferentes, que abarcan la apreciación o comparación de diversos timbres desarrollados en la experimentación de esta investigación.

A continuación, comentaremos todas las preguntas, haciendo referencia a qué sonido está grabado, así como frecuencia, valores iniciales de los algoritmos, qué algoritmos están siendo utilizados y todo lo relevante para identificar ese sonido y sus características. Explicaremos también cuál es la intención y estrategia de la pregunta, indicando de ese modo cuál es el resultado que añoramos alcanzar. Todos los archivos sonoros de esta encuesta están grabados en el apéndice 5.1., subcarpeta 5 para su consulta.

**La pregunta número uno** hace referencia al archivo sonoro *Ejemplo 1* que contiene sonidos pulsados con la misma fundamental (200 Hz) con cambios en los armónicos del 8 al 16 realizados a través de una cadena de Mandelbrot con valor inicial  $c = -1,95$  (relacionado a la teoría II del apartado 2.2.2.).

Las preguntas se relacionan con la escucha psicoacústica de ese sonido pulsado producto de nuestra experimentación, para averiguar el origen personal de percepción que pueda tener el sujeto. Para ello, elaboramos tres respuestas que, en realidad, son verdaderas, aunque solamente una de ellas contiene la idea inicial de elaboración del sonido: cambios de notas, cambio de timbre y cambio de armónicos.

Si escuchamos el archivo, percibimos cómo esas tres ideas están presentes, visto que hay un cambio de frecuencias, al cual consideramos como armónicos, pero no un cambio de fundamental. El encuestado percibe eso como un cambio de nota, o sea, de la frecuencia o frecuencias fundamentales. ¿Percibe quizás algo como un cambio de acordes?

La segunda respuesta es el cambio de timbre, que es nuestra intención como experimentación, pero como hemos comentado antes, el resultado de la experimentación es un timbre, pero desde nuestro punto de vista, al cambiar los armónicos no se percibe un cambio de timbre tan claro. Nos gustaría averiguar qué escucha el encuestado en ese

sentido y, si esos cambios en las frecuencias de lo que creamos como armónicos se notan como tal, que es la respuesta tres, o sea, se percibe que hay un cambio de armónicos, pero no se percibe un cambio de timbre. Este aspecto es fundamental para analizar los resultados de nuestra experimentación.

**La pregunta número dos** se elabora en base a la idea del mismo concepto de psicoacústica, y se le ofrecen al encuestado cuatro respuestas, todas son correctas y serán elegidas dependiendo de la sensibilidad de escucha y percepción de cada uno.

El sonido es una frecuencia estable de 1000 Hz de una onda de MandelBrotL en la cual se modula el valor de  $c$  (relacionado a la teoría I del apartado 2.2.1.) cambiando así la forma de onda, obteniendo la transición entre una frecuencia y ruido. Los cambios en el valor de  $c$  oscilan entre valores periódicos y caóticos para obtener ese efecto.

Si observamos las respuestas, la que más se ajusta a la idea inicial o generativa del sonido es la última, respuesta cuatro, en la que la frecuencia cambia su forma de onda. Sin embargo, el origen de la manipulación desata varios procesos paralelos, como hemos podido ver en el apartado anterior. La generación de armónicos por el cambio de forma de onda, cada vez más irregular, termina por formar un ruido, que es la presencia de muchos armónicos en varias frecuencias simultáneamente. Entendido esto, la percepción del oyente le puede llevar a constatar únicamente el cambio de frecuencia a ruido, siempre y cuando individualmente se entiendan esos dos conceptos como los entiendo yo, visto que, para muchos compositores, el ruido es equivalente a un sonido o frecuencia. Sin embargo, y desde mi punto de vista, ese proceso ocurre en el archivo de sonido al que hace referencia la pregunta.

La respuesta dos también es correcta, visto que podemos escuchar claramente al empezar el cambio sonoro en ese ejemplo, se escucha claramente la aparición de un armónico de octava inferior y luego la manifestación rápida de lo que entiendo yo por ruido, pudiendo entenderse ese proceso como sonidos añadidos a la frecuencia inicial.

En la tercera respuesta, como hemos comentado antes, se aprecia la aparición de nuevos armónicos, como el de octava inferior a la frecuencia inicial. Al igual que en la pregunta uno, la idea aquí es establecer si el encuestado percibe el origen de la manipulación sonora que estamos ejerciendo en el timbre, o percibe antes el resultado o consecuencia de esa manipulación. También buscamos comprobar la flexibilidad de esta onda, demostrando que puede ser perceptible como frecuencia y como ruido.

En **la pregunta número tres** tenemos como ejemplo sonoro sonidos pulsados con la misma fundamental (80 Hz) con armónicos del 8 al 16, realizados a través de una cadena de Mandelbrot con valor inicial  $c = -1,95$  (relacionado a la teoría II del apartado

2.2.2.), en los cuales el primero contiene todos los armónicos de la cadena de Mandelbrot, al segundo se le aplican dinámicas relacionadas a la misma cadena de Mandelbrot con valores positivos y negativos; al tercer sonido se le aplican las mismas dinámicas pero solamente con valores positivos (ambos relacionados al apartado 2.2.2.) y al último sonido se le aplica una reverberación con valores de reflexión de la misma cadena de Mandelbrot al primer sonido. Aquí se busca que se reconozca la diferencia entre todos los sonidos que hemos conseguido en la teoría II y añadiendo a uno de esos sonidos la reverberación Mandelbrot que hemos desarrollado en el apartado anterior.

Así como en las preguntas anteriores, todas las respuestas son correctas, donde en mi punto de vista y percepción, entiendo que la respuesta más buscada es la dos, que designa un cambio de timbre. Como antes se ha comentado, en estos sonidos, aunque lleven todos la misma fundamental y armónicos, la manipulación de la dinámica así como la aplicación de reverberación sí implica un cambio de timbre perceptible, en mi opinión. Lo que buscamos aquí, obviamente, es saber si ese efecto se aprecia en los encuestados de la misma manera. La respuesta uno puede ser apreciada si se consideran los armónicos como notas y la respuesta tres, que en realidad intenta saber si se aprecia cambio en los armónicos por la diferencia de dinámicas entre los sonidos, donde algún armónico puede desaparecer o resaltarse. Eso podría ser percibido como cambio de armónicos.

La respuesta cuatro es evidente, desde mi punto de vista, la reverberación es muy notable en el último pulso de sonido, pero también es importante saber si para los encuestados eso es igual de obvio que para mí, o hay otras respuestas que desde su percepción son más importantes.

**La pregunta número cuatro** se refiere al mismo archivo *Ejemplo 3* e intenta relacionar el timbre construido en la teoría II, a través de nuestra memoria perceptiva, con timbres que los sujetos de esta encuesta, tal y como lo definimos antes, puedan conocer con seguridad. Como hemos comentado anteriormente en el apartado 2, el timbre resultante de nuestra teoría II, con articulación pulsada, puede parecerse a una cuerda pulsada, y cuando empiezan a ser modulados sus armónicos pueden asemejarse a un sonido metálico. Ante la duda y necesidad de comprobar si los encuestados sienten esa misma relación, y de acuerdo con nuestro análisis perceptivo, se elaboraron tres posibles timbres fácilmente reconocibles, desde, digamos, un timbre relacionado a armónicos consonantes, como es una cuerda pulsada, algo más metálico, como es el timbre de una campana, con algunos armónicos disonantes y otros consonantes, pero un claro timbre metálico y, por último, lo que sería un timbre con una mayoría de armónicos disonantes,



como puede ser un impacto metálico, ya distante quizás de una frecuencia determinada y más cercano a un ruido. Obviamente, le damos la opción al oyente de no reconocer el sonido según alguno de esos timbres preestablecidos.

La comparación a un timbre conocido anteriormente es importante para identificar todos esos aspectos de consonancia y disonancia de los armónicos, sus efectos en el timbre, así como en el reconocimiento de una frecuencia o de un ruido más precisamente. Este aspecto juega un rol en el futuro de la experimentación, que vamos a comentar posteriormente en el apartado 3.1., estado actual de la cuestión y posibles desarrollos en el futuro.

En **la pregunta número cinco** grabamos tres ondas sonoras diferentes con la misma frecuencia de 500 Hz. La primera es una onda sinusoidal, una onda oblicua y perfecta que no genera armónicos y solo puede ser emitida por un ordenador. Esa onda es fácilmente reconocible por todos nosotros, visto que se ha utilizado en diversos aparatos electrónicos y es, por ejemplo, la frecuencia que escuchamos de señal cuando llamamos a una persona por teléfono. La segunda onda es nuestra onda Gauss y la tercera una MandelBrotL. La intención de esta pregunta es detectar si nuestras ondas tienen un timbre reconocible y distinguible entre otras ondas electrónicas típicas, como puede ser una onda sinusoidal. En el caso de las posibles respuestas, esta vez no todas son correctas, pues queremos detectar si en lugar de escuchar un cambio de timbre, se escucha un cambio de frecuencia fundamental, o si se cree que hay únicamente una superposición de sonidos que construyen un timbre diferente. La última respuesta es relevante, por si no se detecta ningún tipo de diferencia entre los timbres.

**La pregunta número seis** hace referencia al sonido teñido desarrollado en la teoría II, con una fundamental a 110 Hz con cambios en los armónicos del 8 al 16 realizados a través de una cadena de Mandelbrot con valor inicial  $c = -1,95$ . Como hemos comentado antes, ese sonido es muy estético, desde mi punto de apreciación, pero queda la duda de que si lo que se escucha exactamente es un cambio de acordes, un cambio de armónicos o, en definitiva, un cambio de timbre. Mi opinión, a partir de mi propia apreciación, es que la estética del sonido es muy buena y crea claramente un timbre, pero no se aprecia un cambio real de timbre junto al cambio de armónicos; lo que se aprecia, a mi juicio, es sencillamente un cambio de armónicos. Nos interesa por lo tanto saber si los encuestados tienen esa misma opinión.

**La séptima y última pregunta** se basa en el *Ejemplo 6* que son sonidos pulsados con la misma fundamental (36 Hz), sin cambios en los armónicos a los que se les aplica una reverberación con valores de reflexión según una cadena de Mandelbrot con valor

inicial -1,95, los cuales cambian en todos ataques (relacionados al apartado 2.2.1.); sonidos que hemos analizado en el apartado anterior. Estos sonidos tienen una gran estética musical y serán también utilizados en la composición de la obra final. Queremos con esta pregunta averiguar si la reverberación se nota como elemento cambiante, o si se percibe un cambio de timbre, aunque lo único que manipulamos son los tiempos de reflexión de la reverberación. Con esto, queremos demostrar una manipulación tímbrica desde otro elemento musical, que es la reverberación. Las respuestas posibles, por lo tanto, van en esa dirección, exponiendo posibilidades como cambios de frecuencia, timbre y armónicos, que pueden ser, con la ayuda de la psicoacústica, percibidos como elementos cambiantes.

La encuesta final redactada es la siguiente:

### **Encuesta sobre el resultado de la experimentación con sonidos electrónicos.**

#### **Tesis: La composición algorítmica y su aplicación en la generación de timbres, reverberación y espacialización.**

Con esta encuesta intentamos obtener, a través de la escucha de terceras personas, la efectividad del resultado obtenido en la experimentación con sonidos electrónicos desarrollados en esta tesis.

Para ello, se han elaborado algunas preguntas de opción múltiple relacionadas directamente con un archivo sonoro que debe de ser escuchado anteriormente a su respuesta. Elige, por favor, como máximo de dos respuestas a cada pregunta.

1) En el archivo *Ejemplo 1* se escucha seis veces un sonido pulsado regularmente. ¿Qué aprecias como cambio entre una pulsación y la siguiente?

- ☐ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

2) En el *Ejemplo 2* se escucha una frecuencia que sufre varios cambios y retorna a la misma frecuencia inicial. ¿Qué aprecias como cambio en esa frecuencia?

- ☐ Cambio de la frecuencia a ruido
- ☐ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias y ruido)
- ☐ Se aprecia la aparición de nuevos armónicos
- ☐ La frecuencia cambia su forma de onda

3) En el *Ejemplo 3* se escucha cuatro sonidos pulsados. ¿Qué diferencia aprecias entre cada uno de ellos?

- ☐ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ En algunos de ellos se percibe algo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

4) Si pudieras relacionar los sonidos que escuchaste en el *Ejemplo 3* con alguno de los siguientes sonidos, ¿cuál sería?

- ☐ Impacto metálico
- ☐ Cuerda pulsada
- ☐ Campanas
- ☐ Ninguno de los sonidos anteriores

5) En el *Ejemplo 4* se puede escuchar 3 frecuencias (notas) consecutivamente. ¿Qué diferencia puedes apreciar entre las tres frecuencias?

- ☐ Cambio de la frecuencia (nota) fundamental
- ☐ Diferencia de timbres entre las frecuencias
- ☐ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias o ruido)
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

6) En el *Ejemplo 5* se escucha un sonido teñido durante 50 segundos. ¿Qué tipo de cambios crees que sufre ese sonido durante ese tiempo?

- ☐ Cambio de acordes
- ☐ Cambio de timbre
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

7) En el *Ejemplo 6* se escucha un sonido pulsado varias veces. ¿Qué diferencia aprecias en cada uno de ellos?

- ☐ Cambio de frecuencia (nota) fundamental
- ☐ Cambio de timbre
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

### ***Fin de la encuesta***

La encuesta fue rellenada por seis personas diferentes, con los siguientes resultados (número de veces que se indicó las respuestas y porcentajes de las mismas):

Pregunta 1:

2 A; 2 B; 5 C; 0 D;                      porcentajes: C = 55,5 %; A = 22,25 %, B = 22,25 %

Pregunta 2:

0 A; 6 B; 1 C; 1 D;                      porcentajes: B = 75 %; C = 12,5 %, D = 12,5 %

Pregunta 3:

0 A; 3 B; 5 C; 3 D, 0 E;      porcentajes: C = 45,5 %; B = 27,25 %, D = 27,25 %

Pregunta 4:

2 A; 3 B; 2 C; 0 D;      porcentajes: B = 43 %; A = 28,5 %, C = 28,5 %

Pregunta 5:

0 A; 5 B; 6 C; 0 D; 0 E;      porcentajes: C = 55,5 %; B = 44,5 %

Pregunta 6:

1 A; 1 B; 5 C; 1 D; 0 E;      porcentajes: C = 62,5 %; A = 12,5 %, B = 12,5 %, D = 12,5 %

Pregunta 7:

0 A; 1 B; 5 C; 2 D; 0 E;      porcentajes: C = 62,5 %; B = 12,5 %, D = 25 %

### **3.1. Conclusiones de la encuesta**

La encuesta fue planteada, como se ha podido constatar en su desarrollo, para confrontar la percepción de los timbres generados en la experimentación de esta investigación por el autor de la misma y por personas ajenas a ella.

Hemos desarrollado un concepto general de apreciación perceptiva de los timbres que desarrollamos con conceptos más específicos para su constatación como la acústica, la cultural y la psicoacústica. Determinados los dos primeros conceptos para que influenciasen la encuesta de la manera más positiva y objetiva posibles, las preguntas y respuestas están, por lo tanto, más basadas en los resultados de origen psicoacústicos, o sea, del planteamiento de cómo los sujetos están percibiendo esos sonidos, pero especialmente si reconocen timbres, cambio de timbres y elementos que constituyen el mismo.

Visto que las dos teorías desarrolladas para la construcción de los sonidos utilizando la síntesis no-estándar unida a la composición algorítmica parten de una manipulación generativa de timbres a través de sus conceptos constructivos, como son la forma de onda, los armónicos consonantes/disonantes y sus dinámicas y duraciones aplicadas, como estrategia de análisis conectada a la percepción psicoacústica,

intentaremos detectar si el encuestado percibe un cambio de timbre o si percibe una alteración en estos aspectos que estamos manipulando, más específicamente, si son capaces de percibir cambios en la forma de onda, por ejemplo, o su resultado práctico que es la generación de armónicos disonantes y ruido como consecuencia final; o en el caso de una manipulación en los armónicos del sonido, si escuchan un cambio de armónicos o un timbre que debería ser el resultado de esa manipulación y, por último y en el caso de la reverberación, si escuchan un cambio de notas, timbre o cambio de tiempo de reverberación en sí. La comparación entre sonidos parecidos, como formas de onda ya existentes con las creadas por nuestra experimentación o sonidos parecidos, como puede ser nuestro sonido pulsado con manipulación de armónicos y sus dinámicas también es importante para detectar si el oyente aprecia un timbre o pequeñas diferencias entre ellos.

Como resultado de la encuesta, por lo tanto, obtendremos información de si nuestros timbres son perceptibles, si la manipulación del origen (forma de onda, armónicos, tiempos de reverberación) es perceptible y si los pequeños detalles entre timbres creados de manera parecida son igualmente perceptibles.

Con esos resultados podremos apreciar, de cara al futuro de esta experimentación y teorías generativas de microsonidos, si la experimentación fue satisfactoria como resultado perceptivo del timbre (visto que en resultados analizados científicamente lo fueron) y que podríamos plantearnos como cambio para ajustar nuestros resultados sonoros de manera más cercana a lo que deseamos.

Debemos acordarnos de que en el planteamiento de las teorías hemos tomado muchas decisiones que tienen una consecuencia implícita en el sonido generado al final de la experimentación y que, de cara al futuro, podrían ser modificados y reestudiados para conseguir el resultado deseado. Sin embargo, y como afirmamos anteriormente en la conclusión del apartado anterior, analizando de manera individual y perceptiva los sonidos, así como los resultados de la experimentación, damos por hecho un logro satisfactorio y un éxito en la experimentación favorable a la creación de sonidos estéticamente utilizables como material composicional. Su demostración estará en la composición musical de una obra que utilice únicamente esos sonidos generados en esta investigación.

Si analizamos ahora las respuestas más frecuentes en cada pregunta, podemos profundizar en esas conclusiones de la encuesta:

- En la pregunta 1 y en relación al archivo de sonido *Ejemplo 1*, el 55 % de los encuestados puede percibir el cambio de los armónicos, pero solo el 22,5 % lo relaciona con un cambio de timbre. Si el sonido en sí es un timbre novedoso por la idea algorítmica

que lo genera y además lo que se percibe son realmente armónicos, el concepto y ejecución del sonido es satisfactoria en su ejecución. Queda cuestionada la percepción de un cambio de timbre relacionada al cambio de armónicos, por lo tanto, en este sonido y de acuerdo a mis percepciones individuales del mismo.

– En la pregunta 2 con relación al archivo de sonido *Ejemplo 2*, la creación de un timbre y su modificación a través de la manipulación de una onda sonora generada algorítmicamente es satisfactoria en su ejecución, tanto en la creación tímbrica a través de una ecuación como en que la manipulación de la forma de onda no puede ser percibida de ninguna manera. Si la gran mayoría de los encuestados, en esa pregunta, cree que se añaden otros sonidos, no pudo percibir que esos sonidos o ruidos no son añadidos artificialmente, pero sí que son armónicos y ruido consecuentes de la manipulación de la forma de onda.

Se puede por lo tanto considerar esa experimentación como satisfactoria en ambos sentidos, tanto en su ejecución, como en su percepción.

– En la pregunta 3, relacionada con el archivo de sonido *Ejemplo 3*, apruebo igualmente, así como el 45,5 % de las respuestas, que se reconozca la manipulación de los armónicos, como hemos comentado anteriormente, pero considero muy satisfactorio como resultado que tres de esas respuestas reconozca un cambio de timbre, visto que se utiliza incluso la reverberación como manipuladora de los mismos.

– En la pregunta 4, relacionada con el archivo de sonido *Ejemplo 3*, donde comparamos los sonidos pulsados desarrollados en la teoría II con sonidos fácilmente reconocibles por el grupo cultural que hemos seleccionado, como son los de una cuerda pulsada, campanas o un impacto metálico, obtenemos respuestas que están divididas entre las tres posibilidades, con una tendencia más grande y, desde la teoría igualmente más precisa, al sonido de campanas, visto que la mitad de los parciales están dispuestos en orden de consonancia y la mitad superior de esos armónicos están dispuestos de forma disonante, lo que le puede dar un perfil claro de frecuencia reconocible y a la vez mezclado por una característica metálica. Sin embargo, aunque fue una minoría, hay que tener en cuenta que algunos de los encuestados sí lo asocian a una cuerda pulsada o a un impacto metálico. Eso demuestra que el timbre creado es algo ajeno a esas tres posibilidades, pero se acerca a todas ellas, visto que la opción «ninguno de los sonidos anteriores» no fue seleccionada por ninguno de los encuestados. Esa asociación a sonidos reales demuestra por lo tanto su utilidad en comprobar, en primero lugar, nuestra teoría de construcción de timbres, utilizando armónicos consonantes y disonantes y su posible resultado y, en segundo lugar, que aunque se comprenda perceptivamente que el

timbre se puede asociar a un timbre conocido, sacando de la memoria personal de los encuestados que el resultado del timbre no es la copia de uno ya existente en la acústica real, pero en sí es un timbre diferente por sí solo.

– En la pregunta 5, relacionada con el archivo de sonido *Ejemplo 4*, el resultado es menos satisfactorio en cuanto a la intención de reconocer tres timbres diferentes, que fue nuestro planteamiento, aunque la proporción entre las respuestas no es del todo insatisfactoria. La mayoría de los encuestados se decanta por percibir que se añadan sonidos a la primera frecuencia, que es una onda sinusoidal y, como hemos comentado, esa es una onda de curva perfecta y que solamente un ordenador la puede ejecutar. Como característica principal, aparte de su timbre específico, esa es una onda que, por la perfección de su forma no genera armónico alguno. Las otras ondas, que son la Gauss y la MandelbrotL, con valores iniciales para que generen una frecuencia distinguible, generan armónicos que pueden haber sido interpretados como sonidos que se unen a una onda tan pura como es la sinuosidad. Aun así, el 44,5 % sí que escucha un timbre diferente en cada onda, lo que sería la respuesta más correcta, pero indudablemente genera una reflexión futura interesante en cómo esas ondas pueden estar conectadas tímbricamente en sus formas más sencillas.

– La pregunta 6, relacionada al archivo de sonido *Ejemplo 5*, se acerca mucho a la expectativa del investigador, o sea, que el porcentaje de respuestas es muy satisfactorio, dado que la mayoría absoluta percibe un cambio de armónicos, o sea, el origen de la manipulación de este sonido teñido con cambios de armónicos realizado en la experimentación comprendida en la teoría II. Está claro que el sonido, desde mi punto de apreciación del mismo, tiene una estética muy interesante y utilizable en una obra musical, pero si nos enfocamos en los resultados tímbricos de la manipulación de los armónicos, queda demostrado que esos cambios no resultan efectivamente en un cambio de timbre perceptible. Podemos concluir que el sonido, por lo tanto, tiene éxito en cuanto a su ejecución, pero, aunque crea un timbre como resultado de experimentación, no resulta reconocible como cambio de timbre la manipulación de sus armónicos, que era la idea central. Esto crea algunas reflexiones para el futuro, que serán analizadas en el apartado siguiente, sobre cómo se podría seguir investigando para que esa manipulación de armónicos terminara por percibirse en un cambio de timbre.

– En la pregunta 7, relacionada con el archivo de sonido *Ejemplo 6*, se ofrece uno de los archivos sonoros de gran interés, en mi opinión, ya que utilizamos la modificación de los tiempos de reverberación para provocar un cambio en las características tímbricas del sonido. Aunque la mayoría de los encuestados percibe un cambio de armónicos en el



sonido, nada más lejos de la realidad, visto que utilizamos únicamente un cambio en el tiempo de reverberación. La reflexión de los armónicos es diferente en cada cambio del tiempo de reverberación y, como consecuencia, su amplificación, como analizamos en el apartado anterior, y tiene como resultado perceptivo algo similar a un cambio de armónicos. Podemos concluir que nuestra intención en que se perciba un cambio de timbre es insatisfactoria, visto que la apreciación de los encuestados contradice nuestras intenciones. No es para ignorar que hubo una minoría de encuestados que sí percibieron un cambio de timbre, indicando que, quizás, el trabajo en ese sentido no es del todo erróneo, pero sí necesitaría un desarrollo mayor para alcanzar esa intención. También es relevante que el 25 % de los encuestados haya conseguido distinguir la raíz de manipulación del sonido, que son los cambios de tiempo de reverberación, tarea difícil desde mi punto de vista, pero detectable en una cuarta parte de los encuestados. Como apreciación individual, el timbre es muy estético en su sonoridad y será utilizado en la composición de una obra musical y también satisfactoria es su ejecución dentro de la teoría desarrollada para su experimentación, queda saber hasta dónde queremos llegar con sus resultados, si bien que provoque un claro y perceptible cambio de timbre o que no se reconozca únicamente un cambio de armónicos. Desde mi punto de vista, esa percepción del cambio de armónicos ya es un logro que sugiere una diferencia clara en la percepción de los sonidos, diferencia que no aclara la realidad de lo que está siendo manipulado (tiempo de reverberación) y que ese resultado es satisfactorio como manipulación tímbrica y resultado estético.

Como resultado global de esta encuesta, y de acuerdo con las estrategias que hemos elaborado para su desarrollo, así como su real intención de comparar los timbres desarrollados en esta investigación y experimentación sonora de nuestras teorías generativas, podemos concluir, en líneas generales que:

- La encuesta fue satisfactoria en su elaboración y ejecución para conseguir los objetivos de esta investigación, ampliando los parámetros sobre el análisis tímbrico de los sonidos creados y aportando una mejor apreciación de sus resultados.
- Contrastando las estrategias para la percepción de los timbres, se han logrado diferentes respuestas de los encuestados que nos permiten reflexionar sobre el estado de la cuestión y posibles utilidades de la investigación en el futuro.

– El resultado de la encuesta se acerca a nuestra percepción individual de los sonidos, y es por lo tanto satisfactoria en ese ámbito. Esa satisfacción en la encuesta no demuestra, sin embargo, que todos los objetivos perceptivos de esta investigación hayan sido alcanzados y queda pendiente, igualmente, una reflexión sobre ello.

– Su contenido nos abre una reflexión sobre los timbres conseguidos en nuestra experimentación y su efectividad tímbrica, dentro del estado actual de la cuestión, y posibles utilidades futuras. Abriremos esas reflexiones, unidas a la conclusión general de la investigación, buscando una visión más global entre los resultados y posibles desarrollos de todo lo investigado.

### **3.2. Conclusiones generales**

La idea inicial de esta tesis estuvo basada en la investigación de diferentes métodos de composición algorítmica, su mejor comprensión y aplicación a lo largo de la historia de la música. A la vez, lanzada la hipótesis de la que «la composición algorítmica genera microsonidos», se genera una línea de investigación que busca unir esa herramienta o método composicional que es la composición algorítmica con la «síntesis no-estándar» y, con ello, crear sonidos con la ayuda de la electrónica y teorías aplicadas a ese fin.

Para conectar todos esos elementos y teorías musicales, se trazó una línea clara que conecta los principios y métodos utilizados por diferentes compositores a lo largo de la historia, desconectando de esa forma la composición algorítmica a un estilo musical, demostrando para ello que pudo ser aplicada y utilizada en diversos periodos de la historia de la música.

Aunque la composición algorítmica abarca mucho más que la relación de las matemáticas o algoritmos para la creación de elementos musicales, se expusieron algunos algoritmos que eran de mayor interés, así como los resultados composicionales del autor de esta investigación y el potencial generador que tienen, tanto de respuestas de autosimilitud como por los gráficos que generan. Esos algoritmos fueron el puente o la conexión de la composición algorítmica acústica a la «síntesis no-estándar».

Adquirida esa idea general de los procesos e intenciones de la utilización de la composición algorítmica, se abrió paso para comprender la «síntesis no-estándar» y, de la misma forma, su aplicación a lo largo de la historia por diferentes compositores y sus

ideas básicas y generales para la construcción de sonidos con la utilización de la electrónica.

Entendidos esos procesos de «síntesis no-estándar» y su concepto, se conectó su posible utilización a la actualidad y para ello, a los *softwares* disponibles para la ejecución de sonidos electrónicos, los cuales fueron utilizados en esta investigación. Si bien, su utilización fue más allá de la de un simple usuario, visto la programación en C++ a través de comparaciones y modificaciones de unidades generadoras de sonido de SuperCollider, para llegar a la posible creación de ondas sonoras idealizadas a través de esos algoritmos de mayor interés para esta investigación. Esa programación no fue tarea simple, sino un arduo trabajo que terminó por lograr un resultado final muy interesante para la demostración de nuestra hipótesis.

Expuestas todas las ideas y herramientas necesarias para llegar a esa demostración de hipótesis, lanzamos cuatro teorías de construcción de sonidos electrónicos, reverberación y panoramización, a través de la utilización tanto de la composición algorítmica y sus principios básicos, unidos a los principios de la «síntesis no-estándar» y con la utilización de nuestros algoritmos destacados. Esas teorías se demostraron viables y realizables, y sus resultados sonoros son parte de esta tesis, adjuntos a ella a través de un apéndice electrónico digital (5.1.-CD).

Una vez realizados esos sonidos, expandimos la utilización de los algoritmos a otros parámetros y dimensiones musicales, aplicándolos de forma concluyente a la espacialización, las dinámicas y su resultado sonoro en los sonidos generados, así como en la reverberación, buscando la creación de timbres y texturas sonoras a través de esos elementos con un resultado satisfactorio.

Durante la investigación se buscó la imparcialidad del creador, pero dado que uno mismo tiende a ser subjetivo en el análisis de sus resultados, se creó una encuesta en la cual participaron músicos, compositores y artistas sonoros. Dicha encuesta ayudó a obtener una conclusión bastante acertada y próxima a la que obtuvo el investigador, dando por satisfactorios tanto los procesos como los resultados conseguidos.

Sin embargo, y como se ha comentado a lo largo de los apartados 2 y 3 y durante todo el proceso de experimentación y análisis científico y perceptivo de los objetivos logrados, podemos aportar críticas y apreciaciones del estado actual de la cuestión.

Como hemos afirmado, los timbres logrados en nuestra experimentación tuvieron dos logros básicos: el éxito de la experimentación y la constatación de este logro a través de un análisis exhaustivo de las formas de onda y espectros de los sonidos finales y la obtención de timbres suficientemente estéticos para que sean utilizados como material

composicional en una obra. Quedan algunos detalles que podrían estar más ajustados a la idea inicial, que son los timbres creados a través de la teoría II, o sea, con la manipulación de la frecuencia de sus armónicos a través de proporciones matemáticas producidas por un algoritmo. Aparte de lo reseñado anteriormente, relativo a que la valoración personal de la estética del sonido es satisfactoria, su resultado final abre paso para profundizar en esa experimentación, quizás, para conseguir ajustar esos sonidos a la teoría de que el cambio de la frecuencia de los armónicos pueda generar timbres diferentes y claramente reconocidos a través de nuestra percepción.

Si revisamos la teoría II, hemos tomado algunas decisiones arbitrarias necesarias para empezar a desarrollar el sonido, que quizás podrían ser reformadas, visto la probabilidad de que afecten al resultado deseado. Por ejemplo, para estabilizar la frecuencia fundamental con una sonoridad más reconocible, hemos modulado únicamente los armónicos de 9 a 16, siendo que los ocho primeros son consonantes. Esa decisión terminó por influir en que el sonido se reconozca por su frecuencia fundamental y un cambio de armónicos cada vez que los modulamos, pero esa modulación no termina de apreciarse como cambio de timbre. Se podría seguir experimentando en ese sentido, probando con la modulación de todos los armónicos aparte de su fundamental, probar con otros algoritmos más caóticos que los que hemos probado, hasta conseguir un resultado sonoro más ajustado a la percepción del cambio de timbres.

Otra posibilidad que queda inexplorada es el sonido base (onda gris) que utilizamos para construir el sonido. La onda gris filtrada a través de un filtro ya establecido por el programa, puede crear ya y desde el principio, una identidad sonora individual, que por mucho que apliquemos la teoría de armónicos, seguirá siendo percibida por su timbre filtrado característico y, por lo tanto, la teoría no tiene el efecto deseado. Cabe la exploración de otros sonidos base, quizás otros ruidos con menos personalidad individual o filtros menos resonantes que puedan concluir en otros resultados tímbricos más ajustados a la teoría de cambios perceptibles de timbre.

La reverberación es la otra teoría que no terminó por demostrar un cambio perceptible de timbres. Que la reverberación afecta al timbre original de una fuente de sonido está claro y demostrado por muchas experimentaciones anteriores (Winckel, 1967, pp. 58-66), pero lo que deseábamos lograr es un perceptible cambio de timbre con los cambios en el tiempo de reverberación. Si bien esos cambios están justificados en la percepción de un cambio de armónicos cuando cambiamos los tiempos de reverberación sin cambiar el sonido original, probablemente las proporciones matemáticas utilizadas o

las pequeñas diferencias entre los cambios de los tiempos de reverberación no terminen de hacer efectiva esa percepción de cambios de timbre.

El resultado de esta experimentación abre paso, quizás, a probar los cambios de los tiempos de reverberación con diferentes algoritmos trabajando simultáneamente para evitar proporciones matemáticas o quizás elaborar una reestructuración de la reverberación con mayores extremos en los valores de esos tiempos para que fuesen más perceptibles al oído humano. Es posible que, como consecuencia de ello, se consigan diferentes ambientes sonoros que puedan ser muy interesantes en su utilización musical.

Por último, en cuanto al estado de la cuestión, vale la pena comentar la experimentación relacionada con la panoramización tridimensional del sonido. Aunque la teoría fue aplicada satisfactoriamente en el desarrollo práctico de la misma, su constatación real todavía no ha sido posible, visto la imposibilidad de conseguir un sistema tridimensional cuadrático de altavoces con el cual apreciar la real efectividad de esa panoramización y posibles soluciones para su desarrollo futuro según los actuales resultados.

A parte de esa, hasta ahora, imposible constatación de su eficacia, quedaría por constatar igualmente la comparación perceptiva de esa panoramización con diferentes valores iniciales para el algoritmo de Lorenz, hurgar un poco más en esos posibles y distintos valores iniciales posibles y apreciar todas esas diferencias. Igualmente interesante sería investigar entre otros posibles algoritmos tridimensionales y aplicarlos todos a la misma teoría. Queda abierta esa comparación y si el oyente podría escuchar el movimiento que trazan los algoritmos que lo generan, vista la limitación que proviene de la misma limitación de la disposición de los altavoces. Es evidente que cuando el sonido está en un rincón donde solo suenan uno o dos altavoces es fácil reconocer su posición, pero ¿cómo lo percibimos cuando el sonido está posicionado en el centro exacto en el espacio que limita la disposición de los altavoces, pero se caracteriza por la ausencia de ellos?, ¿percibiríamos su movimiento? ¿Al utilizar el sistema Ambisonics los cálculos de absorción y panoramización ayudarían en esa percepción? Existiría la posibilidad de repensar el sistema de amplificación para una mejor apreciación de esa panoramización. Todos estos aspectos quedan pendientes de constatación en el estado actual de nuestra investigación.

Como posibles desarrollos futuros, creo que esta investigación abre personalmente (y quizás a otros compositores) la posibilidad de la creación de timbres más individuales electrónicamente hablando. Si analizamos la misma historia de la síntesis de sonidos, y

en especial la síntesis no-estándar, podemos ver cómo los pioneros en este tema, como fueron Xenakis, Brün o König, buscaban desarrollar programas o métodos elaborados para generar sonidos que terminaban por darles un resultado sonoro, si no novedoso del todo, único como mínimo. La estandarización de los programas de síntesis de sonido como pueden ser los que hemos utilizado, como el SuperCollider o el Max/MSP, terminó por limitar al usuario a la programación de objetos sonoros ya existentes y su posible manipulación. Como resultado, podemos observar cómo las obras con electrónica realizadas a partir del siglo XXI se parecen cada vez más en su origen sonoro y llegan a tener un lenguaje común reconocible. Investigar en nuevas posibilidades es una idea elemental en los compositores y, quizás, poder componer sus propios timbres sea una herramienta para ello. En esta investigación que se centra en la composición algorítmica, hemos enfocado métodos generacionales conectados a esos procesos algorítmicos que tuvieron los resultados descritos, más o menos satisfactorios, pero estéticamente del agrado de su autor, lo que viene a ser un punto muy relevante como logro final.

Obviamente, no podemos abarcar todas las ideas que tenemos en una única investigación, y por eso el planteamiento de su desarrollo futuro es importante. Aparte de lo ya comentado en esta conclusión de cómo podríamos seguir desarrollando nuestra teoría II y IV, hablando de la teoría I, que es la generación de timbres a través de la construcción de una onda sonora, si nos detenemos en lo que hemos investigado en esta tesis como métodos generativos para la composición algorítmica: ¿Qué resultados sonoros obtendríamos, por ejemplo, si utilizáramos probabilidades para construir una onda sonora, a través de la aplicación de cadenas de Markov? ¿O con un algoritmo recursivo como pueden ser los sistemas de Lindenmayer? Son posibilidades complejas, que exigirán una futura y ardua experimentación y programación, pero se vislumbran como plan de futuro desarrollo. ¿Y si nos saltamos los métodos puramente algorítmicos que hemos investigado aquí y conectamos la creación de una onda sonora con otras disciplinas como la fotografía, la arquitectura o las artes plásticas y programamos, por ejemplo, una onda sonora a partir del *skyline* de una ciudad captado en una foto? ¿Y si hacemos un proceso de comparación de resultados sonoros a través de la recopilación histórica del desarrollo del *skyline* de una ciudad durante los últimos 100 años? ¿Y si hacemos una onda sonora a partir de los patrones creados por una foto de las montañas al horizonte de una provincia de China? ¿O de los dibujos hechos por el viento en las paredes montañosas del Gran Cañón? ¿Una onda sonora a partir de un dibujo del artista gráfico Manfred Mohr? Como podemos ver, las posibilidades de creación son infinitas, los posibles resultados tímbricos inimaginables, pero sin sombra de duda, interesantes.

Otro campo relevante en el desarrollo futuro de esta investigación es la panoramización. A parte de las reflexiones que hicimos en el estado actual de esta cuestión en concreto, queda todo un mundo de posibilidades si hablamos de panoramización binaural (Peters, Lossius y Schacher, 2012), que viene siendo objeto de investigación en centros como el IRCAM, que ya desarrolló su objeto para Max/MSP llamado SPAT. ¿Cómo percibiríamos nuestra experimentación tridimensional del sonido con ese *software*? ¿Sería satisfactoria su percepción? Aparte de la utilización de un objeto preprogramado por el IRCAM, ¿sería posible sumergir en una investigación binaural, aplicando una teoría de sus cálculos y programando personalmente esa posible espacialización hasta conseguir un producto sonoro satisfactorio?

Sabemos que la espacialización binaural solamente es posible actualmente a través de la utilización de auriculares circumaurales: ¿Sería posible conseguir una apreciación tridimensional del sonido con un tercer método que no fuera la disposición cuadrática de los altavoces o la espacialización binaural? ¿Sería posible la aplicación de nuestra teoría IV de espacialización algorítmica dentro de un proceso novedoso?

Como podemos ver, existe un mundo de experimentación incluso más allá de lo actualmente posible, para que todos esos métodos generativos que hemos expuesto aquí puedan seguir siendo desarrollados en el futuro y basados en esta investigación.

#### **4. Composición de Atmospheres en 2 canales: conceptos y estrategias**

Para terminar de demostrar nuestra hipótesis: «La composición algorítmica genera microsonidos», y de acuerdo con la definición que hemos expuesto de este concepto al principio de la investigación, nos faltaría el último paso, que sería componer una obra para electrónica fija con los sonidos desarrollados a lo largo de esta investigación.

Para ello, vamos a exponer algunos conceptos que vamos a utilizar y otras estrategias para sacar mejor provecho de estos sonidos.

Como conceptos básicos composicionales, empecemos por definir el número de canales que utilizaremos en la obra. Como hemos dicho en el apartado anterior sobre la panoramización en ocho canales y las teorías aplicadas algorítmicamente a este proceso, consideramos que utilizarlos es una posibilidad muy atractiva e interesante seguramente como resultado sonoro final, pero tengamos en mente la necesidad de que esa obra llegue a un máximo de personas, no solamente a través de esta investigación, sino a nivel general, donde podemos abrir la posibilidad de su escucha a través de las nuevas tecnologías, utilizando por ejemplo Soundcloud para su acceso libre en internet. La obra

está ubicada en el apéndice digital de esta investigación, pero le añadimos además una posibilidad extra de escucha, utilizando el acceso por internet, ya comentado. Para ello, y sin tener ninguna posibilidad de momento de exponer esta composición en otro sistema con posibilidad de una espacialización en más canales, la estrategia es componerla con una panoramización estéreo, que permita su escucha de manera sencilla y a través de cualquier dispositivo electrónico.

Otra estrategia a aplicar a la obra es la duración de la misma. Partiendo de la base de que es necesario un tiempo para exponer los sonidos, pero que no sea excesivo como para que el oyente termine por dejar de escuchar en medio de la obra, intentaremos utilizar sonidos atractivos que mantengan la curiosidad de la escucha y por un tiempo no demasiado largo. Es conveniente, no solo escribir una obra como estrategia para validar nuestra hipótesis, sino también una obra que nos represente artísticamente. Establezcamos el tiempo de duración de la obra, por lo tanto, alrededor de tres minutos; suficientes para comprender el concepto de obra musical, exponer varios sonidos desarrollados en esta investigación y no extenderse demasiado en ello.

Intentemos como concepto, utilizar todos los sonidos desarrollados aquí, aprovechando la oportunidad para experimentar un poco más con sus posibilidades, aplicando reverberación a diversos sonidos, experimentando con diversas tesituras en estos sonidos, microtonalidad, aleatoriedad en sus ataques, panoramización y ritmos, buscando desarrollar los sonidos creados en su carácter más estético.

Expuestos estos primeros conceptos y estrategias, continuamos con los sonidos que hemos encontrado, la descripción de su origen y la modificación de sus códigos para llegar a estos resultados sonoros:

- El principio de la obra se constituye por los sonidos pulsados a cada tres segundos, con frecuencia de 36 Hz y modulación en el tiempo de reverberación que hemos analizado en nuestra teoría II y también forma parte de la encuesta como *Ejemplo 6*. Ese sonido me cautivó desde el primer momento que lo escuché y considero su estética extremadamente musical como material composicional. Lo utilizaremos como idea de cohesión musical, terminando la obra con ese mismo sonido, pero con una frecuencia diferente, uniéndola de esa manera formalmente.
- Ese sonido pulsado del principio de la obra será superpuesto en el segundo 28 por una onda MandelBrotL con frecuencia de 3450 Hz con una modulación de los valores iniciales de su onda del -1,25 a 1,99 durante cinco segundos. Esa onda sonará dentro de una reverberación Mandelbrot con



valores iniciales de -1,95. Dejaremos la reverberación seguir sonando después que termine la onda Mandelbrot ese proceso de modulación de su onda, creando una atmósfera dubitativa sobre lo que sonará posteriormente. Esas transiciones entre sonidos serán aplicadas varias veces como técnica compositiva para crear ese tipo de atmósferas entre cambios de sonidos, que da nombre a la obra.

- En el segundo 38 y acoplándose a esa cola que dejó la reverberación del sonido anterior, introducimos nuestro sonido teñido de la teoría II con una frecuencia de 2100 Hz como pedal agudo. Mientras suena ese pedal, le superpondremos cascadas de 30 pulsos del sonido de nuestra teoría II con frecuencias aleatorias microtonales entre 500 y 1000 Hz, y con un tiempo de espera entre ellos igualmente aleatorio entre 0,1 y 0,3 segundos. Esos sonidos están inmersos en una reverberación Mandelbrot con valores iniciales referentes a la cadena que empieza por -1,95. Esta superposición de sonidos genera una segunda atmósfera que dura hasta el segundo 64, donde entra en transición con estos dos sonidos anteriores un tercer sonido, con frecuencia 247 (B3) que es nuestro sonido teñido de nuestra teoría II. Ese sonido sufre modulaciones de sus armónicos de acuerdo a una cadena de Mandelbrot con valor inicial -1,7 con transiciones entre los cambios de armónicos con tiempo aleatorio entre 7 y 11 segundos. Ese sonido no contiene reverberación y se extiende hasta el segundo 101, donde se superpone a través de otra transición un pedal grave generado por una onda GaussL a 36 Hz, frecuencia que hace referencia a los sonidos del principio de la obra para crear una cohesión sonora por tesitura.
- Mientras suena ese pedal de onda GaussL, lo superponemos con una onda Mandelbrot a 4000 Hz (que suena algo parecido a ruido blanco a esas frecuencias) donde le otorgamos ritmo a través de pulsar su amplitud de 0 a 1 con un pulso constante. Esa onda suena dentro de una reverberación Mandelbrot con valores iniciales de -1,95 y tiene tres incisiones diferentes, utilizando la panoramización para diferenciarlas; la primera vez en estéreo, la segunda vez con panoramización aleatoria entre los dos canales, pero a la misma velocidad que los pulsos de la onda sonora y una tercera vez, con panoramización aleatoria entre los dos canales, pero con velocidad diferente a los pulsos de la onda sonora.

- Para terminar la obra, reexponemos los sonidos pulsados del principio de la obra, ahora con una frecuencia más grave, 30 Hz y en tres incisiones diferentes, buscando el fin de la obra; la primera con tres pulsos separados por tres segundos cada, un espacio de tiempo para su resonancia, otra incisión de tres pulsos con 5 segundos entre cada uno, una última espera para la resonancia y un último pulso definitivo para terminar.

Como se ha comentado anteriormente, utilizamos todos los sonidos desarrollados en esta investigación, construyendo una obra con ellos, última acción para demostrar nuestra hipótesis: «La composición algorítmica genera microsonidos».

La obra completa está grabada en nuestro apéndice digital 5.1., en la subcarpeta 7 (Obras), así como en la dirección web de Souncloud: <https://soundcloud.com/luisfonseca26/atmospheres-for-electronics-2ch>.

## **5.0. Apéndices**

### **5.1. Apéndice I (digital - CD)**

El apéndice digital fue creado para almacenar todos los datos de la parte de esta investigación que fue desarrollada electrónicamente. Existe una gran parte de horas dedicadas a la programación de todos esos resultados sonoros expuestos en esta investigación que deberían poder ser consultados juntamente con la parte escrita para que ambos puedan ser comprendidos satisfactoriamente.

A continuación, se expone la organización en el disco de esos archivos y una pequeña explicación sobre ellos para que su consulta sea más rápida y clara.

Carpeta apéndice 5.1.:

#### **1. Carpeta C++:**

En esta carpeta se encuentran los códigos de CMake y Xcode desarrollados para la creación de las cuatro ondas elaboradas según la teoría I (apartado 2.2.1.).

Las subcarpetas se llaman Gauss, GaussL, Mandelbrot y MandelbrotL, que contienen, como se ha indicado, los códigos y proyectos referentes a cada una de las ondas desarrolladas y mencionadas en el apartado 2.2.1.

Estas carpetas contienen el resultado producido por los códigos de la carpeta anterior: las ondas y los archivos necesarios para que funcionen en SuperCollider. Están separadas igualmente por los algoritmos que las generan y las extensiones de los archivos son:

- (.scx): UGens de SuperCollider.
- (.sc): Información sobre el UGen para que SuperCollider lo pueda controlar.
- (.schelp): Archivo de ayuda para el usuario de SuperCollider, que contiene información y ejemplos para el correcto funcionamiento y manipulación del UGen.

La subcarpeta de patrones contiene archivos .sc que son patrones basados en los algoritmos de Gauss y Mandelbrot. Esos son los patrones que fueron desarrollados en el apartado 2.2.2.1. Las rutinas desarrolladas en el apartado 2.2.2.2. están grabadas en los archivos de SuperCollider que están en la siguiente carpeta.

### 3. Códigos de SuperCollider

Contiene los archivos .scd que son códigos realizados en SuperCollider para desarrollar los sonidos de la teoría II (apartado 2.2.2.) y la reverberación utilizando valores de reflexión según las respuestas del algoritmo de Mandelbrot (apartado 2.3.1.).

### 4. Patches de Max/MSP

Esta carpeta contiene el patch desarrollado en Max/MSP para la panoramización algorítmica en tres dimensiones según los valores de respuesta del atractor de Lorenz (apartado 2.3.2.).

### 5. Ejemplos para la encuesta

Contiene los archivos sonoros utilizados como ejemplo de los sonidos construidos en la investigación para su escucha durante la realización de la encuesta propuesta (apartado 3).

### 6. Ejemplos de sonidos generados por la investigación:

Archivos sonoros grabados como ejemplos y para la escucha y percepción de todos los detalles que diferencian el resultado sonoro generado por la aplicación de las teorías y otros elementos trabajados y explicados en los apartados 2.2.2. a 2.3.1.

Los archivos están numerados y corresponden a:

- 1) Mandelbrot (no-interpolada) a 1000 Hz;  $c = -1$
- 2) Mandelbrot (no-interpolada) a 1000 Hz;  $c = -1,5$
- 3) Mandelbrot (no-interpolada) a 1000 Hz;  $c = -1,95$
- 4) MandelbrotL (interpolada) a 1000 Hz;  $c = -1$
- 5) MandelbrotL (interpolada) a 1000 Hz;  $c = -1,5$
- 6) MandelbrotL (interpolada) a 1000 Hz;  $c = -1,95$
- 7) Gauss (no-interpolada) a 1000 Hz;  $a = -6.7$ ;  $b = -0.3$
- 8) GaussL (interpolada) a 1000 Hz;  $a = -6.7$ ;  $b = -0.3$
- 9) Instrumento 1 sin modulación de armónicos
- 10) Instrumento 1 con modulación de armónicos Mandelbrot =  $-1,95$
- 11) Instrumento 1 con modulación de armónicos y dinámicas positivas con Mandelbrot =  $-1,95$
- 12) Instrumento con modulación de armónicos y dinámica con negativos con Mandelbrot =  $-1,95$
- 13) Instrumento con modulación de armónicos y reverberación con Mandelbrot =  $-1,95$
- 14) Panoramización 3D en 8 canales utilizando el atractor de Lorenz y como fuente de sonido una onda Mandelbrot (no-interpolada) a 1000 Hz;  $c = -1,95$

## 7. Obras

En esta carpeta de adjuntan las partituras completas de las obras de mi autoría que fueron analizadas o citadas en los apartados 1.6.1. y 1.7. así como la obra Atmospheres en dos canales compuesta única y exclusivamente con los sonidos desarrollados en esta investigación. Esa obra dura tres minutos y está compuesta en estéreo para facilitar su escucha en cualquier tipo de terminal electrónico:

1. Gauss Sonata para violín y piano.
2. Henos Sonata para violoncello y piano.
3. Mandelbrot Sonata para contrabajo y piano.
4. Atmospheres in 2ch.

## **5.2. Apéndice II - Encuestas**

Se adjunta aquí las encuestas originales devueltas por las personas que la rellenaron. Al pie de cada una se puede consultar el perfil de cada uno de ellos (músico, compositor, artista sonoro):

**Encuesta sobre el resultado de la experimentación con sonidos electrónicos**  
**Tesis: La composición algorítmica y su aplicación en la generación de timbres, reverberación y espacialización.**  
**Luis Augusto da Fonseca**

Con esta encuesta intentamos obtener, a través de la escucha de terceras personas, la efectividad del resultado obtenido en la experimentación con sonidos electrónicos desarrollados en esta tesis.

Para ello, se han elaborado algunas preguntas de múltiples elecciones, relacionadas directamente con un archivo sonoro que debe de ser escuchado anteriormente a su contestación. Elige, por favor, como máximo de dos respuestas a cada pregunta.

1) En el archivo *Ejemplo 1* se escucha seis veces un sonido pulsado regularmente. Que aprecias como cambio entre una pulsación y la siguiente:

- ☐ Cambio de notas
- ☒ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

2) En el *Ejemplo 2* se escucha una frecuencia que sufre varios cambios y retorna a la misma frecuencia inicial. Que aprecias como cambio en esa frecuencia:

- ☐ Cambio de la frecuencia a ruido
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias y ruido)
- ☐ Se aprecia la aparición de nuevos armónicos
- ☐ La frecuencia cambia su forma de onda

3) En el *Ejemplo 3* se escucha cuatro sonidos pulsados. Que diferencia aprecias entre cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de notas
- ☒ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ En algunos de ellos se percibe algo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

4) Si pudieras relacionar los sonidos que escuchaste en el *Ejemplo 3* con alguno de los siguientes sonidos, cual sería?

- ☐ Impacto metálico
- ☒ Cuerda pulsada
- ☐ Campanas
- ☐ Ninguno de los sonidos anteriores

5) En el *Ejemplo 4* se puede escuchar 3 frecuencias (notas) consecutivamente. Que diferencia puedes apreciar entre las tres frecuencias:

- ☐ Cambio de la frecuencia (nota) fundamental
- ☒ Diferencia de timbres entre las frecuencias
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias o ruido)
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

6) En el *Ejemplo 5* se escucha un sonido teñido durante 50 segundos. Que tipo de cambios crees que sufre ese sonido durante ese tiempo:

- ☐ Cambio de acordes
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

7) En el *Ejemplo 6* se escucha un sonido pulsado varias veces. Que diferencia precias en cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de frecuencia (nota) fundamental
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

**Encuesta sobre el resultado de la experimentación con sonidos electrónicos**  
**Tesis: La composición algorítmica y su aplicación en la generación de timbres, reverberación y espacialización.**  
**Luis Augusto da Fonseca**

Con esta encuesta intentamos obtener, a través de la escucha de terceras personas, la efectividad del resultado obtenido en la experimentación con sonidos electrónicos desarrollados en esta tesis.

Para ello, se han elaborado algunas preguntas de múltiples elecciones, relacionadas directamente con un archivo sonoro que debe de ser escuchado anteriormente a su contestación. Elige, por favor, como máximo de dos respuestas a cada pregunta.

1) En el archivo *Ejemplo 1* se escucha seis veces un sonido pulsado regularmente. Que aprecias como cambio entre una pulsación y la siguiente:

- ☒ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

2) En el *Ejemplo 2* se escucha una frecuencia que sufre varios cambios y retorna a la misma frecuencia inicial. Que aprecias como cambio en esa frecuencia:

- ☐ Cambio de la frecuencia a ruido
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias y ruido)
- ☐ Se aprecia la aparición de nuevos armónicos
- ☒ La frecuencia cambia su forma de onda

3) En el *Ejemplo 3* se escucha cuatro sonidos pulsados. Que diferencia aprecias entre cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☒ En algunos de ellos se percibe algo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio



4) Si pudieras relacionar los sonidos que escuchaste en el *Ejemplo 3* con alguno de los siguientes sonidos, cual sería?

- ☒ Impacto metálico
- ☐ Cuerda pulsada
- ☐ Campanas
- ☐ Ninguno de los sonidos anteriores

5) En el *Ejemplo 4* se puede escuchar 3 frecuencias (notas) consecutivamente. Que diferencia puedes apreciar entre las tres frecuencias:

- ☐ Cambio de la frecuencia (nota) fundamental
- ☒ Diferencia de timbres entre las frecuencias
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias o ruido)
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

6) En el *Ejemplo 5* se escucha un sonido teñido durante 50 segundos. Que tipo de cambios crees que sufre ese sonido durante ese tiempo:

- ☐ Cambio de acordes
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

7) En el *Ejemplo 6* se escucha un sonido pulsado varias veces. Que diferencia precias en cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de frecuencia (nota) fundamental
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☒ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

**Encuesta sobre el resultado de la experimentación con sonidos electrónicos**  
**Tesis: La composición algorítmica y su aplicación en la generación de timbres, reverberación y espacialización.**  
**Luis Augusto da Fonseca**

Con esta encuesta intentamos obtener, a través de la escucha de terceras personas, la efectividad del resultado obtenido en la experimentación con sonidos electrónicos desarrollados en esta tesis.

Para ello, se han elaborado algunas preguntas de múltiples elecciones, relacionadas directamente con un archivo sonoro que debe de ser escuchado anteriormente a su contestación. Elige, por favor, como máximo de dos respuestas a cada pregunta.

1) En el archivo *Ejemplo 1* se escucha seis veces un sonido pulsado regularmente. Que aprecias como cambio entre una pulsación y la siguiente:

- ☐ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

2) En el *Ejemplo 2* se escucha una frecuencia que sufre varios cambios y retorna a la misma frecuencia inicial. Que aprecias como cambio en esa frecuencia:

- ☐ Cambio de la frecuencia a ruido
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias y ruido)
- ☐ Se aprecia la aparición de nuevos armónicos
- ☐ La frecuencia cambia su forma de onda

3) En el *Ejemplo 3* se escucha cuatro sonidos pulsados. Que diferencia aprecias entre cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ En algunos de ellos se percibe algo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

4) Si pudieras relacionar los sonidos que escuchaste en el *Ejemplo 3* con alguno de los siguientes sonidos, cual sería?

- ☐ Impacto metálico
- ☐ Cuerda pulsada
- ☒ Campanas
- ☐ Ninguno de los sonidos anteriores

5) En el *Ejemplo 4* se puede escuchar 3 frecuencias (notas) consecutivamente. Que diferencia puedes apreciar entre las tres frecuencias:

- ☐ Cambio de la frecuencia (nota) fundamental
- ☒ Diferencia de timbres entre las frecuencias
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias o ruido)
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

6) En el *Ejemplo 5* se escucha un sonido teñido durante 50 segundos. Que tipo de cambios crees que sufre ese sonido durante ese tiempo:

- ☒ Cambio de acordes
- ☐ Cambio de timbre
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

7) En el *Ejemplo 6* se escucha un sonido pulsado varias veces. Que diferencia precias en cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de frecuencia (nota) fundamental
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

**Encuesta sobre el resultado de la experimentación con sonidos electrónicos**  
**Tesis: La composición algorítmica y su aplicación en la generación de timbres, reverberación y espacialización.**  
**Luis Augusto da Fonseca**

Con esta encuesta intentamos obtener, a través de la escucha de terceras personas, la efectividad del resultado obtenido en la experimentación con sonidos electrónicos desarrollados en esta tesis.

Para ello, se han elaborado algunas preguntas de múltiples elecciones, relacionadas directamente con un archivo sonoro que debe de ser escuchado anteriormente a su contestación. Elige, por favor, como máximo de dos respuestas a cada pregunta.

1) En el archivo *Ejemplo 1* se escucha seis veces un sonido pulsado regularmente. Que aprecias como cambio entre una pulsación y la siguiente:

- ☐ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

2) En el *Ejemplo 2* se escucha una frecuencia que sufre varios cambios y retorna a la misma frecuencia inicial. Que aprecias como cambio en esa frecuencia:

- ☐ Cambio de la frecuencia a ruido
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias y ruido)
- ☐ Se aprecia la aparición de nuevos armónicos
- ☐ La frecuencia cambia su forma de onda

3) En el *Ejemplo 3* se escucha cuatro sonidos pulsados. Que diferencia aprecias entre cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☒ En algunos de ellos se percibe algo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

Músico/Artista sonoro

4) Si pudieras relacionar los sonidos que escuchaste en el *Ejemplo 3* con alguno de los siguientes sonidos, cual sería?

- ☐ Impacto metálico
- ☒ Cuerda pulsada
- ☐ Campanas
- ☐ Ninguno de los sonidos anteriores

5) En el *Ejemplo 4* se puede escuchar 3 frecuencias (notas) consecutivamente. Que diferencia puedes apreciar entre las tres frecuencias:

- ☐ Cambio de la frecuencia (nota) fundamental
- ☐ Diferencia de timbres entre las frecuencias
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias o ruido)
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

6) En el *Ejemplo 5* se escucha un sonido teñido durante 50 segundos. Que tipo de cambios crees que sufre ese sonido durante ese tiempo:

- ☐ Cambio de acordes
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☒ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

7) En el *Ejemplo 6* se escucha un sonido pulsado varias veces. Que diferencia precias en cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de frecuencia (nota) fundamental
- ☐ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

## **Encuesta sobre el resultado de la experimentación con sonidos electrónicos**

### **Tesis: La composición algorítmica y su aplicación en elementos acústicos**

#### **Luis Augusto da Fonseca**

Con esta encuesta intentamos obtener, a través de la escucha de terceras personas, la efectividad del resultado obtenido en la experimentación con sonidos electrónicos desarrollados en esta tesis.

Para ello, se han elaborado algunas preguntas de múltiples elecciones, relacionadas directamente con un archivo sonoro que debe de ser escuchado anteriormente a su contestación. Elige, por favor, como máximo de dos respuestas a cada pregunta.

1) En el archivo *Ejemplo 1* se escucha seis veces un sonido pulsado regularmente. Que aprecias como cambio entre una pulsación y la siguiente:

- ☐ Cambio de notas
- ☒ Cambio de timbre
- ☒ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

2) En el *Ejemplo 2* se escucha una frecuencia que sufre varios cambios y retorna a la misma frecuencia inicial. Que aprecias como cambio en esa frecuencia:

- ☐ Cambio de la frecuencia a ruido
- ☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias y ruido)
- ☒ Se aprecia la aparición de nuevos armónicos
- ☐ La frecuencia cambia su forma de onda

3) En el *Ejemplo 3* se escucha cuatro sonidos pulsados. Que diferencia aprecias entre cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de notas
- ☒ Cambio de timbre
- ☐ Cambio de armónicos
- ☒ En algunos de ellos se percibe algo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

4) Si pudieras relacionar los sonidos que escuchaste en el *Ejemplo 3* con alguno de los siguientes sonidos, cual sería?

☒ Impacto metálico

☐ Cuerda pulsada

☐ Campanas

☐ Ninguno de los sonidos anteriores

5) En el *Ejemplo 4* se puede escuchar 3 frecuencias (notas) consecutivamente. Que diferencia puedes apreciar entre las tres frecuencias:

☐ Cambio de la frecuencia (nota) fundamental

☒ Diferencia de timbres entre las frecuencias

☒ A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias o ruido)

☐ Cambio de armónicos

☐ No aprecio ningún tipo de cambio

6) En el *Ejemplo 5* se escucha un sonido teñido durante 50 segundos. Que tipo de cambios crees que sufre ese sonido durante ese tiempo:

☐ Cambio de acordes

☒ Cambio de timbre

☒ Cambio de armónicos

☐ Cambio en el tiempo de reverberación

☐ No aprecio ningún tipo de cambio

7) En el *Ejemplo 6* se escucha un sonido pulsado varias veces. Que diferencia precias en cada uno de ellos:

☐ Cambio de frecuencia (nota) fundamental

☒ Cambio de timbre

☐ Cambio de armónicos

☒ Cambio en el tiempo de reverberación

☐ No aprecio ningún tipo de cambio

**Encuesta sobre el resultado de la experimentación con sonidos electrónicos**  
**Tesis: La composición algorítmica y su aplicación en la generación de timbres, reverberación y espacialización.**  
**Luis Augusto da Fonseca**

Con esta encuesta intentamos obtener, a través de la escucha de terceras personas, la efectividad del resultado obtenido en la experimentación con sonidos electrónicos desarrollados en esta tesis.

Para ello, se han elaborado algunas preguntas de múltiples elecciones, relacionadas directamente con un archivo sonoro que debe de ser escuchado anteriormente a su contestación. Elige, por favor, como máximo de dos respuestas a cada pregunta.

1) En el archivo *Ejemplo 1* se escucha seis veces un sonido pulsado regularmente. Que aprecias como cambio entre una pulsación y la siguiente:

- ☐ Cambio de notas
- ☐ Cambio de timbre
- ☐ **Cambio de armónicos**
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

2) En el *Ejemplo 2* se escucha una frecuencia que sufre varios cambios y retorna a la misma frecuencia inicial. Que aprecias como cambio en esa frecuencia:

- ☐ Cambio de la frecuencia a ruido
- ☐ **A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias y ruido)**
- ☐ Se aprecia la aparición de nuevos armónicos
- ☐ La frecuencia cambia su forma de onda

3) En el *Ejemplo 3* se escucha cuatro sonidos pulsados. Que diferencia aprecias entre cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de notas
- ☐ **Cambio de timbre**
- ☐ **Cambio de armónicos**
- ☐ En algunos de ellos se percibe algo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio



4) Si pudieras relacionar los sonidos que escuchaste en el *Ejemplo 3* con alguno de los siguientes sonidos, cual sería?

- ☐ Impacto metálico
- ☐ **Cuerda pulsada**
- ☐ **Campanas**
- ☐ Ninguno de los sonidos anteriores

5) En el *Ejemplo 4* se puede escuchar 3 frecuencias (notas) consecutivamente. Que diferencia puedes apreciar entre las tres frecuencias:

- ☐ Cambio de la frecuencia (nota) fundamental
- ☐ **Diferencia de timbres entre las frecuencias**
- ☐ **A la frecuencia se añade otros sonidos (otras frecuencias o ruido)**
- ☐ Cambio de armónicos
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

6) En el *Ejemplo 5* se escucha un sonido teñido durante 50 segundos. Que tipo de cambios crees que sufre ese sonido durante ese tiempo:

- ☐ Cambio de acordes
- ☐ Cambio de timbre
- ☐ **Cambio de armónicos**
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

7) En el *Ejemplo 6* se escucha un sonido pulsado varias veces. Que diferencia precias en cada uno de ellos:

- ☐ Cambio de frecuencia (nota) fundamental
- ☐ Cambio de timbre
- ☐ **Cambio de armónicos**
- ☐ Cambio en el tiempo de reverberación
- ☐ No aprecio ningún tipo de cambio

### **5.3. Apéndice III - Obras**

Se adjunta aquí los movimientos de las obras compuestas por mí que fueron analizadas en los apartados 1.6. y 1.7. Las obras completas (incluyendo todos sus movimientos) están en el apartado I digital (5.1. - CD) y en la subcarpeta *Obras*.

# Gauss Sonata

for Violin and Piano

Luis Fonseca

*Energico* (♩ = 120)

Violin

Piano

*ff*

*f*

*mf*

*ff*

*f*

*mf*

*p*

[illegible]

23

23

*ff*

26

*mf*

26

*mp*

29

29

32

*rit.*

32

*p*

36 *a tempo*

*mp* 7 7 7 7

36 5 *mp* 5 5

40 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7

40 5 5 5 5

40 *8va*

40

44 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7

44 5 5 5 5

44 *8va*

44

48 *rit.* 7 7 7 7 7 7 7 7

48 5 5 5

## Gauss Sonata

52 *a tempo*  
pizz.  
c.l.  
*mp*

52  
*p*

56  
pizz.  
*pp*

60  
pizz.  
*mp*

60  
*p*

63  
*p*

63  
*p*

66

*f*

69

*f*

72

*ff*

75

arco

*p* sempre sur G

*p*

The musical score is presented in a standard piano format with three systems. Each system contains a single treble staff, a grand staff (treble and bass), and a single bass staff. The key signature is one sharp (F#). Measure numbers 66, 69, 72, and 75 are indicated at the beginning of their respective systems. Dynamics include *f* (forte), *ff* (fortissimo), and *p* (piano). The instruction 'arco' is present above measure 75, and 'sempre sur G' is written below the first staff of measure 75. The piece concludes with a final chord in measure 75.



78

78

81

pizz.

c.l.

*p*

*p*

85

85

88

*mp*

*pp*

*rit.*

DS-0009

## III

*Indù* (♩ = 120 )

*pizz.* *mf* *f*

*p*

*pp*

*arco sur pont.*

*pizz.* *f*

*5*

*12*

\* ∽ = Fast vibrato, extremely big, to change the intonation of the note

14

arco

*f*

*ff*

16

18

21

24

27

*fff*

30

33

36

39

39

*mp*

*p*

*mp*

43

*mf*

*p*

*mp*

46

DS-0007

49 ord.

*p*

*ff*

54 *Meno* (♩ = 92 )  
pizz.

*p*

*ff*

*mf*

*ff*

62

*f*

*mf*

*p*

*ff*

70 *Tempo primo* (♩ = 120 )  
L.H. pizz

*f*

col legno

73

Musical score for measures 73-75. The system consists of a single staff with a bass clef. Measure 73 starts with a quarter rest, followed by a half note G2, a half note F2, and a half note E2. Measure 74 continues with a half note D2, a half note C2, and a half note B1. Measure 75 begins with a quarter rest, followed by a half note A1, a half note G1, and a half note F1. The system ends with a double bar line. The piano part is represented by three empty staves with a grand staff brace on the left.

*Meno* (♩ = 92)

76

*ff* *p* *rit.*

Musical score for measures 76-82. The system consists of a single staff with a bass clef. Measure 76 starts with a quarter rest, followed by a half note G2, a half note F2, and a half note E2. Measure 77 continues with a half note D2, a half note C2, and a half note B1. Measure 78 begins with a quarter rest, followed by a half note A1, a half note G1, and a half note F1. Measure 79 starts with a quarter rest, followed by a half note E2, a half note D2, and a half note C2. Measure 80 continues with a half note B1, a half note A1, and a half note G1. Measure 81 begins with a quarter rest, followed by a half note F1, a half note E1, and a half note D1. Measure 82 starts with a quarter rest, followed by a half note C1, a half note B0, and a half note A0. The system ends with a double bar line. The piano part is represented by three empty staves with a grand staff brace on the left.

*a tempo* (♩ = 120)

83

*arco* *ff* *f*

Musical score for measures 83-84. The system consists of a single staff with a bass clef. Measure 83 starts with a quarter rest, followed by a half note G2, a half note F2, and a half note E2. Measure 84 continues with a half note D2, a half note C2, and a half note B1. The system ends with a double bar line. The piano part is represented by three empty staves with a grand staff brace on the left.

85

Musical score for measures 85-88. The system consists of a single staff with a bass clef. Measure 85 starts with a quarter rest, followed by a half note G2, a half note F2, and a half note E2. Measure 86 continues with a half note D2, a half note C2, and a half note B1. Measure 87 begins with a quarter rest, followed by a half note A1, a half note G1, and a half note F1. Measure 88 starts with a quarter rest, followed by a half note E2, a half note D2, and a half note C2. The system ends with a double bar line. The piano part is represented by three empty staves with a grand staff brace on the left.

88

Measures 88-90. The score is in G major (one sharp). Measure 88 features a complex bass line with many beamed sixteenth notes and a treble line with sustained chords. Measure 89 continues the bass line's complexity. Measure 90 shows a more active treble line with eighth notes and a simpler bass line.

91

Measures 91-93. Measure 91 has a treble line with a half note and a bass line with eighth notes. Measure 92 features a treble line with a half note and a bass line with eighth notes. Measure 93 shows a treble line with a half note and a bass line with eighth notes.

94

Measures 94-96. Measure 94 has a treble line with a half note and a bass line with eighth notes. Measure 95 features a treble line with a half note and a bass line with eighth notes. Measure 96 shows a treble line with a half note and a bass line with eighth notes.

97

Measures 97-100. Measure 97 has a treble line with a half note and a bass line with eighth notes. Measure 98 features a treble line with a half note and a bass line with eighth notes. Measure 99 shows a treble line with a half note and a bass line with eighth notes. Measure 100 has a treble line with a half note and a bass line with eighth notes.



100

Measures 100-102. The score is in 3/4 time. The right hand (treble clef) features a melodic line with eighth and sixteenth notes, often beamed together. The left hand (bass clef) provides a steady accompaniment with eighth notes. The key signature has one sharp (F#).

103

Measures 103-105. Measure 103 continues the previous texture. Measures 104 and 105 introduce a new section for the left hand, marked *ff* (fortissimo) and *arco* (arco). The right hand continues with its melodic pattern. The left hand's new part consists of eighth notes with accents.

106

Measures 106-108. The left hand's *ff* *arco* part continues. The right hand has some rests in measure 106, then resumes its melodic line. The left hand's accompaniment remains consistent.

109

Measures 109-111. The left hand's *ff* *arco* part continues. The right hand features a melodic line with some longer notes and ties. The left hand's accompaniment remains consistent.

111

This system contains measures 111, 112, and 113. Measure 111 features a complex texture with a single eighth note in the upper bass staff, a dense sixteenth-note accompaniment in the lower bass staff, and a sixteenth-note accompaniment in the lower treble staff. Measures 112 and 113 continue this texture, with the upper bass staff playing a melodic line of eighth notes. Measure 113 concludes with a whole note chord in the upper treble staff and a sixteenth-note accompaniment in the lower treble staff.

114

This system contains measures 114, 115, and 116. Measure 114 features a single eighth note in the upper bass staff, a dense sixteenth-note accompaniment in the lower bass staff, and a sixteenth-note accompaniment in the lower treble staff. Measures 115 and 116 continue this texture, with the upper bass staff playing a melodic line of eighth notes. Measure 116 concludes with a whole note chord in the upper treble staff and a sixteenth-note accompaniment in the lower treble staff.

# Mandelbrot Sonata for Double Bass and Piano

Awarded with a "Honorable Mention" on the "David Walter International Composition Competition 2016"  
from the ISB (International Society of Bassists/ USA)

Luis Fonseca (2015)

Vuoto (♩ = 72)

Double Bass

Piano

The musical score is written for Double Bass and Piano in 4/4 time, with a tempo of 72 beats per minute. The key signature has one flat (B-flat). The score is divided into four systems, each containing staves for both instruments.

- System 1 (Measures 1-7):** The Double Bass part is mostly rests. The Piano part features a series of chords in the right hand and single notes in the left hand, starting with a *p* (piano) dynamic and a *Red.* (ritardando) marking.
- System 2 (Measures 8-13):** The Double Bass part begins with a melodic line starting at measure 8, marked *sempre mp* (mezzo-piano). The Piano part continues with chords and single notes.
- System 3 (Measures 14-18):** The Double Bass part continues its melodic line. The Piano part features a more active right hand with chords and a melodic line in the left hand, marked *mf* (mezzo-forte). A *p* (piano) dynamic and *Red.* marking appear at the bottom of the system.
- System 4 (Measures 19-20):** The Double Bass part continues its melodic line. The Piano part features a series of chords in the right hand and a melodic line in the left hand, marked *p* and *mf*. A *5* (quintuplet) marking is present in the left hand of the Piano part.

24

*mf*

28

*ff*

*f pesante*

31

33

*pp subito*

Leo.

7

7

Detailed description: This page contains a musical score for piano and voice. The piano part is written in a grand staff (treble and bass clefs). The voice part is written in a single staff. The score is divided into measures 24 through 33. Measure 24 starts with a mezzo-forte (*mf*) dynamic. Measures 28 and 29 feature a fortissimo (*ff*) dynamic. Measure 30 is marked *f pesante*. Measures 31 and 32 show a fortissimo (*ff*) dynamic. Measure 33 begins with a pianissimo (*pp*) dynamic, marked *subito*. The piano part includes various musical notations such as triplets, slurs, and fingerings (e.g., 5, 3, 7). The voice part includes slurs and breath marks. The score concludes with a double bar line and a final note in measure 33.

This musical score is for a piano piece, spanning measures 35 to 40. It is written for three staves: a single treble staff at the top, and a grand staff (treble and bass) below it. The key signature is one flat (B-flat), and the time signature is 4/4.

**Measure 35:** The single treble staff begins with a rest, followed by a half note B-flat, a quarter note A, and a half note G. The grand staff features a complex texture: the upper treble staff has a rapid sixteenth-note scale starting on B-flat, while the lower treble and bass staves play a steady eighth-note accompaniment. The measure concludes with a half note F and a half note E.

**Measure 38:** The single treble staff contains a half note B-flat, a half note A, and a half note G. The grand staff continues with similar textures, including a sixteenth-note scale in the upper treble and eighth-note accompaniment in the lower staves. The measure ends with a half note F and a half note E.

**Measure 40:** The single treble staff starts with a half note B-flat, a half note A, and a half note G. The grand staff features a sixteenth-note scale in the upper treble and eighth-note accompaniment in the lower staves. The measure concludes with a half note F and a half note E.

The score includes various musical notations such as rests, notes, accidentals, and dynamic markings (e.g., *p* for piano). It also includes fingerings (e.g., 5, 7) and articulation marks (e.g., accents).

42



This musical score page contains measures 71 through 76. It is written for a voice part and a piano accompaniment. The key signature has one sharp (F#), and the time signature is 4/4.

**Measures 71-72:** The voice part has whole rests. The piano accompaniment features a melody in the right hand with eighth notes and a bass line in the left hand with chords and eighth notes. A slur with a '7' indicates a 7th fret position on the piano.

**Measures 73-74:** The voice part begins a rapid sixteenth-note scale. The piano accompaniment has chords in the right hand and a bass line in the left hand. A *ff* (fortissimo) dynamic marking is present.

**Measures 75-76:** The voice part continues the sixteenth-note scale. The piano accompaniment features chords in the right hand and a bass line in the left hand. A *fff* (fortississimo) dynamic marking is present. A slur with a '5' indicates a 5th fret position on the piano.

**Measures 77-78:** The voice part continues the sixteenth-note scale. The piano accompaniment features chords in the right hand and a bass line in the left hand. A *fff* (fortississimo) dynamic marking is present. A slur with a '7' indicates a 7th fret position on the piano.



This musical score page contains measures 78 through 90. It is written for a piano and a voice part. The piano part is in G major and 4/4 time. Measures 78-82 show a piano introduction with a melody in the right hand and a bass line in the left hand. Measures 83-87 continue the piano introduction. Measures 88-90 show the voice part entering with a melody in the right hand and a bass line in the left hand. The score includes various musical notations such as notes, rests, accidentals, and dynamic markings.

78

*mp*

*p*

78

83

83

88

88

90

*ff*

90

*f*

92

93

95

espress.

mf

ff

mf

100

100

*p*

Detailed description: This musical score page contains measures 92 through 100. It features a single melodic line and a piano accompaniment. Measures 92-94 show a rapid sixteenth-note run in the melody, with the piano providing harmonic support through chords and triplets. Measures 95-99 continue the melodic development with various dynamics and articulations. Measure 100 is a final measure with a sustained piano accompaniment. The score includes various musical notations such as slurs, ties, and dynamic markings.

Grezzo (♩ = 60)

*p legato* *mf* *mp* *mf*

10

*f*

10

*f*

11

*ff*

11

*fff*

13

pizz.

*ff*

*mp*

*p legato*

Malinconio ( L'istesso tempo )

arco

13

*mp*

3

4

Red.

4

Red.

4

19

*p*

19

*p*

22 *pizz.* *mf*

26 *Grezzo* (♩ = 60) *arco* *ff*

29

30 *f* *mf*

32

Measures 32-33 of a musical score. The top staff (treble clef) contains a melody with a half note, a quarter note, and a half note, followed by a half note and a quarter note. The bottom staff (bass clef) contains a melody with a half note, a quarter note, and a half note, followed by a half note and a quarter note. The key signature has two sharps (F# and C#). The time signature is 4/4. The music is marked with a mezzo-forte (mp) dynamic.

34

Measures 34-36 of a musical score. The top staff (treble clef) contains a melody with a half note, a quarter note, and a half note, followed by a half note and a quarter note. The bottom staff (bass clef) contains a melody with a half note, a quarter note, and a half note, followed by a half note and a quarter note. The key signature has two sharps (F# and C#). The time signature is 4/4. The music is marked with a mezzo-forte (mp) dynamic in measures 34 and 35, and a piano (p) dynamic in measure 36.

37

Measures 37-38 of a musical score. The top staff (treble clef) contains a melody with a half note, a quarter note, and a half note, followed by a half note and a quarter note. The bottom staff (bass clef) contains a melody with a half note, a quarter note, and a half note, followed by a half note and a quarter note. The key signature has two sharps (F# and C#). The time signature is 4/4. The music is marked with a mezzo-forte (mp) dynamic in measure 37 and a piano (p) dynamic in measure 38. The word "rit." (ritardando) is written above the first measure of the top staff.

Carimbó (♩ = 94)

gliss. ric.

*p*

*p molto ritmico*

8

14

*f*

gliss.

17

gliss.

gliss.

21

21

gliss.

23

23

gliss.

26

26

gliss.

gliss.

29

29

gliss.



31 *f* L.H. knock on wood

31 *mf* L.H. knock on wood *mp*

33 *sf*

33 *mf* L.H. knock on wood *gliss.* *sf* *mp*

35 L.H. knock on wood *p*

35 *mf*

39

39 *mf*

42

42

46 L.H. knock on wood

*p* *f*

46

L.H. knock on wood

*mf*

*p*

46

48

48

48

50

50

50

53

53

57

57

62

62

66

66

*mf*

*mp*

*mp*

*mf*

*arco*

*arco*

*arco*

*arco*

*arco*

71 arco *f* *mp*

77 *mf*

82 *f*

86 *f*

88

*ff*

*Ped.*

91

*ff*

*Ped.*

95

*ff*

*Ped.*

99

*mp*

*arco*

*f*

102 arco *p* *mp* pizz. *f* *mp*

107 arco *mp* *f* *mp* *f*

113 *f* gliss.

116 gliss.

120

gliss.

123

gliss.

gliss.

127

*f*

*f*

gliss.

130

gliss.

gliss.

133

133

gliss.

135

135

gliss.

138

138

*f*

gliss.

*f*

Ped.

140

140

*f*

Ped.

Ped.



142

145

148

*mf*

DS-0001

# Hommage a Rothko

for Choir a Capella

Winner of the 4th International Composition Competition "Ennio Morricone"

Luis Fonseca  
(2017)

**Lento** ♩ = 72

Soprano

Alto

Tenor

Baritone

4

ru- la *mf* Ru- 5 6

*mp* Fla- 5 3 5 6 3 vum *mf* Divisi Pur- 6 5 6 Cae-

8

9

ru- le- us  
vum  
Ri- de fus

8

12 **Maestoso**  $\text{♩} = 56$

*p* Di- mi- Di- mi-

Divisi

8

16

*mp* Di- mi- dium Di- mi- dium Di- mi- dium

Divisi

ce ce

*mp*

8

19

*mf* Di- mi- dium

Divisi

ce ce

*mf*

Unison

sit

*mf*

8

DS-0007 Di- mi- dium

21

Mul- Mul-  
*mf* tum  
*mf* Di- Di-  
ce ce  
sit sit  
Di- mi- dium Di- mi- dium

Detailed description: This block contains the musical notation for measures 21 and 22. It features four staves: a vocal line, a soprano line, an alto line, and a bass line. The vocal line has lyrics 'Mul-' and 'Mul- tum' with a mezzo-forte (*mf*) dynamic. The soprano line has lyrics 'Di-' and 'Di-' with a mezzo-forte (*mf*) dynamic. The alto line has lyrics 'ce' and 'ce' and 'sit' and 'sit'. The bass line has lyrics 'Di- mi- dium' and 'Di- mi- dium'. The music is in 6/8 time and includes various musical notations such as notes, rests, and slurs.

23

Mul- Mul-  
*f* tum tum  
*f* Di- Di-  
ce ce  
sit sit  
*f* Pos- Pos-  
*f* Di- mi- dium Di- mi- dium

Detailed description: This block contains the musical notation for measures 23 and 24. It features four staves: a vocal line, a soprano line, an alto line, and a bass line. The vocal line has lyrics 'Mul-' and 'Mul- tum' with a forte (*f*) dynamic. The soprano line has lyrics 'Di-' and 'Di-' with a forte (*f*) dynamic. The alto line has lyrics 'ce' and 'ce' and 'sit' and 'sit' and 'Pos-' and 'Pos-'. The bass line has lyrics 'Di- mi- dium' and 'Di- mi- dium' with a forte (*f*) dynamic. The music is in 7/8 time and includes various musical notations such as notes, rests, and slurs.

25

Mul- Mul-  
tum tum  
Di- Di-  
ce ce  
sit sit  
Pos- Pos-  
Di- mi- dium Di- mi- dium

Detailed description: This block contains the musical notation for measures 25 and 26. It features four staves: a vocal line, a soprano line, an alto line, and a bass line. The vocal line has lyrics 'Mul-' and 'Mul- tum' with a mezzo-forte (*mf*) dynamic. The soprano line has lyrics 'Di-' and 'Di-' with a mezzo-forte (*mf*) dynamic. The alto line has lyrics 'ce' and 'ce' and 'sit' and 'sit' and 'Pos-' and 'Pos-'. The bass line has lyrics 'Di- mi- dium' and 'Di- mi- dium'. The music is in 2/4 time and includes various musical notations such as notes, rests, and slurs.

27 Unison

*f* Quod *mp* O- - *f* res sint Mi- *mp* A- -

*mp* O- - E- I- ra- la A- *mp*

*mp* O- - E- I- I- la A- *mp*

*mp* O- Co- lo- *mp* E- I- - *f* cu- *mp* A-

28

*f* Quod *mp* O- - *f* res sint Mi- *mp* A- -

O- - E- I- ra- la A- *mp*

O- - E- I- I- la A- *mp*

O- *f* Co- lo- *mp* E- I- - *f* cu- *mp* A-

29

*f* Quod *mp* O- - *f* res sint Mi- *mp* A- -

O- - E- I- ra- la A- *mp*

O- - E- I- I- la A- *mp*

O- *f* Co- lo- *mp* E- I- - *f* cu- *mp* A-

30

Divisi Unis.

*f* lo- *mp* E- I- I- *f* cu- *mp* A-

O- Co- lo- res I- cu- la

Quod O- res sint I- ra- la

O- E- I- *f* Mi- *mp* U- A-

31

O- *f* lo- *mp* E- I- I- *f* cu- *mp* A-

O- Co- lo- res I- cu- la

Quod O- res sint I- ra- la

O- E- I- *f* Mi- *mp* U- A-

32

O- *f* lo- *mp* E- I- I- *f* cu- *mp* A-

O- Co- lo- res I- cu- la

Quod O- res sint I- ra- la

O- E- I- *f* Mi- *mp* U- A-

DS-0007

33

1. Solo \*

*mf* No- li Ti-me-ri Ru-brum Fac-tus

*p* O-

Divisi

*p* O-

35

Divisi

*pp* Ni-grum

*pp* Ni-grum

36

2. Solo

*mf* No- li Ti-me-ri Ru-brum Fac-tus

Unison

*p* O-

*p* O-

37

3. Solo

*mf* Ru-brum Fac-tus

Divisi

Unison

*pp* Ni-grum *p* O- *pp* Ni-grum

40

4. Solo

*mf* Ru-brum Fac-tus

Unison

Divisi

*p* O- *pp* Ni-grum Ni-grum

43

Solo ad libitum

*p* Si-len-tium est Ab-so-lu-tus Per-fec-ta est